
Manual de diseño de sistemas fotovoltaicos aislados

Agradecimientos

Se lo agradece mucho a Rafael Espinoza, director del CER-UNI, por las discusiones que tuve con él y las varias cosas que aprendí de ellas, además de su amabilidad y disponibilidad. Asimismo muchas gracias a Manfred Horn, también del CER-UNI, por la entrevista con él y las informaciones interesantes que me dio en este ámbito sobre temas tecnológicos y de gestión de proyectos. Se lo da muchas gracias a Jorge Huaraco, gerente de Electrosol, por haberme acompañado en la visita de sistemas solares en el lago Titicaca, en particular instalados por el CER-UNI. Gracias a Robert Arivilca, gerente de GEO Energía, por su gran disponibilidad y las valiosas informaciones que me proporciono en el tema de la energía fotovoltaica en el Perú y mas allá de ello. Gracias a Ángel Verastegui de la GIZ por la interesante discusión sobre el desarrollo de los sistemas picofotovoltaicos y a José Delgado de Tecnosol en Cajamarca por las informaciones que me proporciono.

Muchas gracias a Jessica Olivares Magill y a Julio Eisman de Perú Microenergía por su disponibilidad en dar informaciones sobre el proyecto de Perú Microenergía en Cajamarca y por la oportunidad de visitar instalaciones del programa Luz en Casa; en este ámbito gracias especialmente a Jessica por haberme acompañado.

Muchas gracias a la ONG Soluciones Prácticas, y en particular a Robert Cotrina, Gilberto Villanueva, Fernando Acosta y Miguel por las informaciones que brindaron y la interesante visita del proyecto de paneles fotovoltaicos en Alto Perú, Cajamarca.

Por fin se lo agradece mucho a mis colegas de Microsol, por haber creado un ambiente de trabajo muy simpático.

Astrid Forget

16 de junio 2011, Lima

Contenido

Agradecimientos	1
Contenido.....	2
Lista de ilustraciones.....	4
Lista de tablas	5
Introducción.....	6
1. Principios básicos de la tecnología	7
1.1. Unión PN.....	7
1.2. Efecto fotovoltaico	8
1.3. Diferentes tipos de silicio	9
1.4. Panel solar	9
1.4.1. Conexión de células fotovoltaicas	9
1.4.2. Magnitudes características.....	10
2. Sistemas fotovoltaicos.....	14
2.1. Sistema Fotovoltaico Domiciliario (SFD) o <i>Solar Home System (SHS)</i>	14
2.1.1. Componentes	14
2.1.1.1. Módulo fotovoltaico	14
2.1.1.2. Batería de acumuladores	14
2.1.1.3. Regulador de carga (o controlador).....	18
2.1.1.4. Inversor CC/CA.....	21
2.1.1.5. Cargas.....	23
2.1.1.6. Tablero de control y accesorios eléctricos.....	24
2.1.2. Resumen	25
2.2. Sistema Fotovoltaico Comunitario (SFC).....	25
2.3. Sistema picofotovoltaico	26
2.3.1. Componentes	26
2.3.2. Estudio UNI / GIZ	26
2.4. Definición de características.....	28
2.4.1. Medidas físicas: estimación de la insolación local	29
2.4.2. Estimación de las cargas.....	30
2.4.3. Cálculo del tamaño del módulo fotovoltaico	31
2.4.4. Cálculo del tamaño de la batería.....	32
2.4.5. Dimensionamiento del regulador de carga	32
2.4.6. Selección del inversor (en caso sea necesario)	32
2.5. Normas técnicas	33
3. Instalación	34

3.1.	Instalación del panel fotovoltaico	34
3.2.	Instalación de los otros elementos.....	36
4.	Operación, mantenimiento y reemplazo	38
4.1.	Operación	38
4.2.	Mantenimiento.....	39
4.2.1.	Mantenimiento de los módulos fotovoltaicos	39
4.2.2.	Mantenimiento del regulador de carga	39
4.2.3.	Mantenimiento de la batería.....	39
4.2.4.	Mantenimiento del inversor.....	41
4.2.5.	Mantenimiento de equipos consumidores y cableados	41
4.2.6.	Otras recomendaciones (29)	42
4.3.	Reemplazo	42
	Conclusión.....	44
	Bibliografía	45
A.	Reacciones químicas en una batería de plomo-ácido	47
B.	Efecto Peukert (7).....	48
C.	Mapa de energía solar del Perú	50
D.	Principios básicos de electricidad.....	51
D.1.	Cargas eléctricas.....	51
D.2.	Corriente eléctrica	51
D.2.1.	Definiciones	51
D.2.2.	Analogía hidráulica	53
D.3.	Circuitos eléctricos	53
D.3.1.	Circuito en serie.....	53
D.3.2.	Circuito en paralelo	54
D.3.3.	Ley de Ohm.....	54
D.4.	Potencia y energía eléctricas.....	54

Lista de ilustraciones

Ilustración 1.a: Unión PN (1).....	7
Ilustración 1.b: Estructura de una célula fotovoltaica	8
Ilustración 1.c: Celda en circuito abierto (1).....	8
Ilustración 1.d: Celda en cortocircuito (1)	8
Ilustración 1.e: Intensidad de corriente de la celda a través de una carga exterior (1)	8
Ilustración 1.f: Paneles solares de diferentes tipos y tamaños	10
Ilustración 1.g: Corte transversal de un panel solar (3).....	10
Ilustración 1.h: Etiqueta de características de un panel solar instalado en Alto Perú (5)	11
Ilustración 1.i: Diagrama MPP (<i>maximum power point</i> – punto de potencia máxima) de una celda fotovoltaica. Este diagrama depende de la temperatura de la celda.	11
Ilustración 1.j: Curva intensidad-tensión en función de la temperatura.....	12
Ilustración 1.k: Curva intensidad-tensión en función de la irradiancia solar.....	12
Ilustración 2.a: Esquema simple de un SFD (6).....	14
Ilustración 2.b: Batería ETNA en Los Uros, Puno (12).....	18
Ilustración 2.c: Batería solar Sonnenschein en Alto Perú, Cajamarca (5).....	18
Ilustración 2.d: Batería estacionar CAPSA en El Alumbro, Cajamarca (13).....	18
Ilustración 2.f: Regulador de marca Steca en Amantaní, proyecto CER-UNI (12)	20
Ilustración 2.g: Regulador con caja de conexiones en el tablero de control, y contador de Ah, en Amantaní, proyecto CER-UNI (12).....	20
Ilustración 2.h: Regulador de marca Phocos en Alto Perú, Cajamarca (5)	20
Ilustración 2.i: Regulador de marca Steca en Yerba Buena Alta, Cajamarca (16).....	20
Ilustración 2.j: Inversor 12V CC/230V CA de marca Xantrex, potencia 500 W, en Alto Perú (5)....	22
Ilustración 2.k: Diferentes tipos de ondas. De izquierda a derecha: cuadro, semisinusoide y sinusoide pura. (18).....	22
Ilustración 2.l: Contador de Ah del CER-UNI en la isla de Amantaní, Puno (12).....	24
Ilustración 2.m: Embalaje de la lámpara Phocos (12).....	28
Ilustración 2.n: Lámpara Phocos cargándose (12).....	28
Ilustración 2.o: Horas de sol máximo diarias (<i>peak sun hours</i>) (6)	29
Ilustración 2.p: Mapa de horas de sol máximo en una parte de América del Sur.....	29
Ilustración 2.q: Mapa de horas de sol máximo en el mundo.....	30
Ilustración 3.a: Panel solar sobre un poste cerca de la vivienda en Alto Perú, Cajamarca (5).....	35
Ilustración 3.b: Panel solar sobre un techo en Campo Alegre, Cajamarca (16).....	35
Ilustración 3.c: Panel solar sobre un techo en la isla de Amantaní, Puno (12).....	35
Ilustración 3.d: Panel solar montado en un poste en Los Uros, Puno (12).....	35
Ilustración 3.e: Ángulo óptimo del panel relativamente a los rayos solares (más luz llega) (18) ..	36
Ilustración 3.f: Ángulo malo (posición vertical), menos luz llega (18)	36
Ilustración 3.g: Ángulo malo (posición horizontal), menos luz llega (18).....	36
Ilustración 3.h: Batería en caja de madera, unida al regulador, en Yerba Buena Alta, Cajamarca (16)	37
Ilustración 3.i: Inversor sobre soporte de madera en Alto Perú, Cajamarca (5)	37
Ilustración 3.j: Esquema de conexiones sin inversor (28).....	37
Ilustración 3.k: Esquema de conexiones con inversor (28).....	37
Ilustración 4.a: Regulador Phocos en Alto Perú. LED verde: buen funcionamiento. LED amarillo 1: batería cargada. (5)	38
Ilustración 4.b: Añadido de agua destilada para mantener el nivel de electrolito (29)	40
Ilustración A.a: Flujos de electrones e iones entre los electrodos (6).....	47
Ilustración B.a: Influencia del coeficiente de Peukert y de la corriente sobre la capacidad de la batería (6).....	49
Ilustración C.a: Energía solar incidente diaria en promedio anual (1975-1990) en el Perú (30)....	50
Ilustración D.a: Corriente eléctrica, generada por el movimiento de electrones	51

Ilustración D.b: Tensión de corriente continua	52
Ilustración D.c: Tensión de corriente alterna.....	52
Ilustración D.d: Circuito en serie.....	53
Ilustración D.e: Circuito en paralelo	54

Lista de tablas

Tabla 1.a: Diferentes tipos de silicio para las células solares.	9
Tabla 2.a: Tipos de baterías	16
Tabla 2.b: Ejemplos de marcas de baterías	17
Tabla 2.c: Funcionamiento de los reguladores en serie o en paralelo (14).....	19
Tabla 2.d: Cargas	24
Tabla 2.e: Componentes de un SFD	25
Tabla 2.f: Diferentes sistemas picofotovoltaicos estudiados por la UNI (20) (21)	27
Tabla 2.g: Ventajas y desventajas de un sistema picoFV en comparación con un SFD (20).....	27
Tabla 2.h: Cálculo de la carga diaria trabajando en CC, L_{CC} . V_n es la tensión nominal del sistema, en general 12 V.....	31
Tabla 2.i: Cálculo de la carga diaria trabajando en CA, L_{CA} . V_n es la tensión nominal del sistema, en general 12 V.....	31
Tabla 3.a: Inclinación idónea del panel (27)	36

Introducción

Con una tasa de electrificación de 78% al nivel nacional, en el Perú quedan 6 millones de personas sin acceso a esta energía, mayormente en zonas rurales de baja densidad de población y de acceso difícil que hace poco rentable la prolongación de la red interconectada nacional hacia ellas. Por tanto la electrificación rural mediante pequeños sistemas autónomos utilizando recursos renovables, como la energía luminosa proviniendo de la radiación solar, se ve como un medio de proporcionar a estas personas electricidad, que además de ser limpia por ser producida a partir de fuentes renovables, les permitirá mejorar su nivel de vida con el acceso a una iluminación de calidad, la posibilidad de utilizar otros aparatos eléctricos y la oportunidad de tener más ingresos al utilizar la electricidad a fines productivas.

El presente documento aspira a aclarar conceptos sobre el diseño de sistemas fotovoltaicos, especialmente Sistemas Fotovoltaicos Domiciliarios (SFD), que son instalaciones autónomas generando electricidad a partir de la energía luminosa del sol. Se destina a personas que quieren difundir esta tecnología vía la implementación de proyectos de sistemas fotovoltaicos, domiciliarios, comunitarios o picofotovoltaicos en el país o vía el desarrollo de canales de distribución de estos productos. Se proporcionarán herramientas de diseño y de instalación de sistemas fotovoltaicos domiciliarios y comunitarios y se mencionarán las tareas a realizar para el buen manejo y el mantenimiento de dichos sistemas.

1. Principios básicos de la tecnología

Un panel fotovoltaico consiste en numerosas células de silicio, llamadas “células fotovoltaicas” porque producen electricidad cuando excitadas por la luz¹. La transformación de energía luminosa en electricidad es llamada efecto fotovoltaico, que fue descubierto en el 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel. El efecto fotovoltaico se obtiene por absorción de los fotones de la luz en un material semiconductor; en los materiales semiconductores se cuentan el silicio y el germanio (columna 4 de la clasificación de elementos).

1.1. Unión PN

Se puede dopar un material semiconductor con “impurezas” para crear un desequilibrio de cargas y así aumentar la conductibilidad. Existen dos tipos de dopajes:

- Material semiconductor dopado N, o sea dopado con átomos pentavalentes (dando electrones). El semiconductor dopado N tiene un mayor número de electrones libres que el semiconductor puro.
- Material semiconductor dopado P, o sea dopado con átomos trivalentes (aceptando electrones). El semiconductor dopado P tiene un menor número de electrones que el semiconductor puro; se dice que tiene “huecos” (ausencias de electrones).

La unión PN consta de un único cristal de material semiconductor, que está dopado para producir material de tipo N en un lado y de tipo P en el otro. (1)

A hacer esta unión, ocurre lo siguiente:

- Se produce una difusión de huecos de la región P a la región N y viceversa una difusión de electrones de la región N a la región P.
- Al haber difusión, algunos huecos que pasan de la región P a la región N y algunos electrones que pasan de la región N a la región P se recombinan hasta alcanzar el equilibrio.
- Después del proceso de difusión y recombinación, se produce en la unión una zona de depleción (o también zona de carga de espacio o zona de vaciamiento) formada por las cargas estáticas (iones) de la estructura cristalina. Se crean los pares de iones con cargas opuestas a ambos lados de la unión. Esta zona carece de electrones libres y huecos.
- En la zona de depleción se forma un campo eléctrico (de la región N a la región P o de los iones positivos a los iones negativos).
- El campo eléctrico hace de la zona de depleción un diodo, sólo permitiendo el flujo de corriente en una dirección: los electrones pueden moverse de la región P a la N, pero no

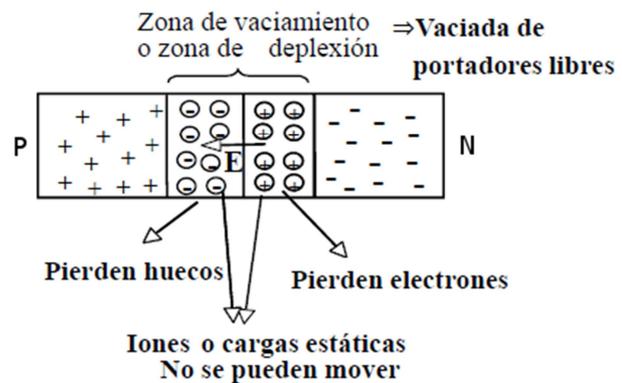


Ilustración 1.a: Unión PN (1)

¹ griego φῶς, φωτός [luz]

de la región N a la P, y viceversa para los huecos. Es decir que sólo los portadores minoritarios de cada región pueden moverse.

1.2. Efecto fotovoltaico

El material semiconductor generalmente utilizado para la fabricación de células fotovoltaicas es el silicio; éstas transforman parte de la energía solar recibida en energía eléctrica.

Una celda fotovoltaica tiene dos capas de material semiconductor dopadas:

- La capa superior se compone de silicio dopado N,
- La capa inferior se compone de silicio dopado P.

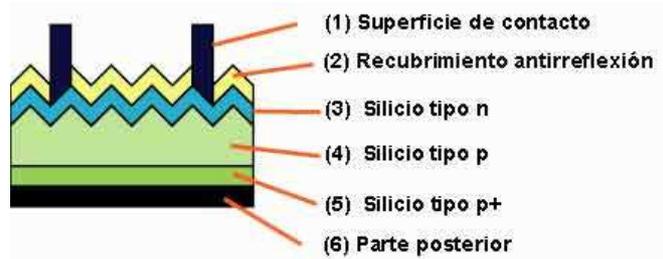


Ilustración 1.b: Estructura de una célula fotovoltaica

Cuando llega un fotón a la celda fotovoltaica, pueden ocurrir tres acontecimientos:

- El fotón puede atravesar el silicio, si no tiene una energía suficiente para arrancar un electrón;
- El fotón puede ser reflejado por el silicio;
- O si tiene una energía suficiente, el fotón puede ser absorbido y arrancar un electrón de valencia (un electrón de la capa superior del átomo) al material semiconductor, creando un par electrón libre – hueco. Bajo el efecto del campo eléctrico existente en la unión PN, cada uno se va por el lado opuesto, en vez de recombinarse rápidamente: cerca de la unión PN, los huecos migran hacia la región P y los electrones hacia la región N, creando una diferencia de potencial (una tensión). Este fenómeno es el efecto fotovoltaico. Si se conecta la célula fotovoltaica a una carga, circulará una corriente eléctrica continua del polo positivo (P) al polo negativo (N).

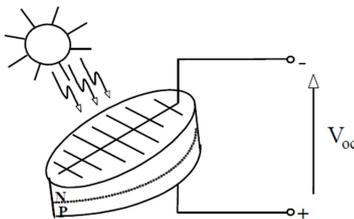


Ilustración 1.c: Celda en circuito abierto (1)

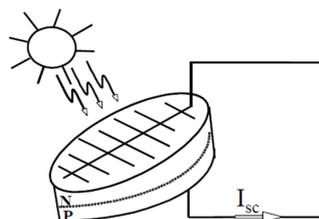


Ilustración 1.d: Celda en cortocircuito (1)

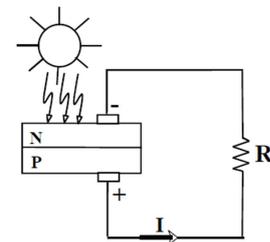


Ilustración 1.e: Intensidad de corriente de la celda a través de una carga exterior (1)

Definición de la tensión de circuito abierto y de la intensidad de cortocircuito:

- Tensión de circuito abierto (cf. Ilustración 1.c): se define como la tensión a los bornes de la celda fotovoltaica o del panel fotovoltaico cuando está en circuito abierto, o sea sin ningún aparato conectado en serie o paralelo. Ninguna corriente circula en un circuito abierto.

- Intensidad de corriente de cortocircuito I_{SC} (cf. Ilustración 1.d): es la intensidad de la corriente que circula cuando la celda o el panel está conectada(o) a sí misma(o).

Se genera corriente eléctrica al llegar fotones de la luz sobre una celda fotovoltaica, hecha de capas de material semiconductor, en general silicio, tratado para presentar propiedades particulares. Eso es llamado el efecto fotovoltaico.

1.3. Diferentes tipos de silicio

Se diferencian varios tipos de células solares según el tipo de silicio empleado:

Tipo de silicio	Estructura	Propiedades
Silicio monocristalino	Celdas compuestas de finas capas de cristal de silicio	Rendimiento de 12 a 16% Pero absorción un poco débil
Silicio policristalino	Celdas compuestas de fines capas de varios cristales de silicio	Rendimiento de 11 a 13% Mejor poder de absorción
Silicio amorfo	El silicio no es cristalizado.	Rendimiento débil de 5 a 9% Buen poder de absorción

Tabla 1.a: Diferentes tipos de silicio para las células solares.

Los rendimientos indicados más arriba son susceptibles de mejorarse por el constante desarrollo. Parece que hoy en día, el rendimiento del silicio policristalino ha mejorado hasta alcanzar el del silicio monocristalino, así que se puede elegir paneles solares de silicio monocristalino o policristalino a un precio casi igual. (2)

1.4. Panel solar

1.4.1. Conexión de células fotovoltaicas

Se conectan varias celdas fotovoltaicas idénticas en serie para conseguir un voltaje adecuado a las aplicaciones eléctricas, ya que cada celda proporciona un voltaje de 0.3 a 0.5 V mientras que para pequeñas aplicaciones, se necesita en general un voltaje en circuito abierto de 12 V por lo menos. Se entiende entonces que para tener este voltaje, se necesitan conectar en serie una treintena de células. Además se conectan celdas en paralelo para obtener la intensidad de corriente deseada. El conjunto de células fotovoltaicas en serie y paralelo forma un panel fotovoltaico o módulo fotovoltaico, también llamado panel solar.



Ilustración 1.f: Paneles solares de diferentes tipos y tamaños²

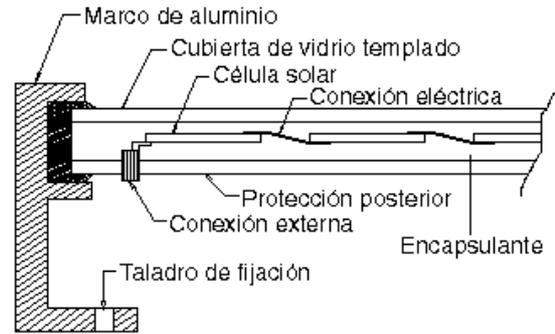


Ilustración 1.g: Corte transversal de un panel solar (3)

Existen paneles solares de diferentes tamaños: más elevados la potencia o el voltaje necesarios, más grande el panel. La corriente proporcionada por un panel solar es continua (corriente continua: CC o DC³), a diferencia de la corriente suministrada por la red interconectada, que es alternativa (corriente alterna: CA o AC⁴).

Las celdas fotovoltaicas modernas son cuadradas o con esquinas redondeadas, con dimensiones alrededor de los 15x15 cm²; entonces un pequeño panel fotovoltaico con voltaje en circuito abierto de 12 V con celdas conectadas en serie tiene una superficie inferior al metro cuadrado. Las celdas fotovoltaicas más antiguas eran circulares, lo que no es óptimo en términos de tamaño del módulo fotovoltaico.

1.4.2. Magnitudes características

Para caracterizar un módulo fotovoltaico se habla de su potencia pico (medida generalmente en W_p , vatios pico). Es la potencia que entrega el panel bajo condiciones estándar de medida de uso universal según la norma EN61215 (4):

- Temperatura de las celdas fotovoltaicas: 25°C
- Irradiancia solar: 1000 W/m². La irradiancia solar corresponde a la potencia incidente por unidad de superficie de la radiación solar.
- Incidencia normal (o sea, perpendicular a la superficie)
- Distribución espectral de la radiación incidente: AM1.5 (masa de aire). El parámetro AM caracteriza el ángulo z de incidencia de la radiación solar (AM aproxima $\frac{1}{\cos z}$). Un valor de 1.5 corresponde a un ángulo de 48.2°, mientras que un valor de 1 indica una incidencia de 0°, o sea al nivel del ecuador.

Estas condiciones siendo bastante optimistas, en general la potencia útil disponible en un momento dado estará inferior a la potencia pico.

La potencia pico P_M es el producto del voltaje y de la corriente de máxima potencia, anotados respectivamente V_M y I_M :

$$P_M = V_M \cdot I_M \quad (1.1)$$

² <http://greenlivingrocks.com/2011/04/22/solar-panels-purchase-12/>

³ Del inglés *Direct Current*

⁴ Del inglés *Alternative Current*

Otras magnitudes que caracterizan un panel son el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito, anotados respectivamente V_{OC} y I_{SC} (del inglés *open current* y *short current*).

El rendimiento η , o eficiencia de conversión energética, se define como el cociente entre la máxima potencia P_M y la insolación incidente P_L sobre el panel, que es el producto de la irradiancia incidente estándar de 1000 W/m^2 por el área del panel (o más bien de la suma de las áreas de cada celda):

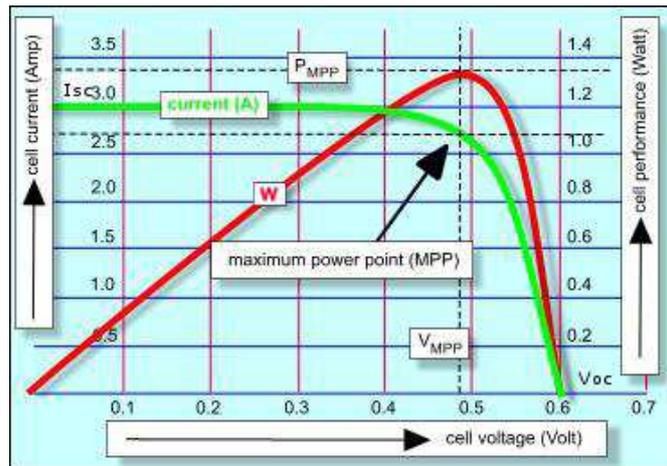


Ilustración 1.i: Diagrama MPP (*maximum power point* – punto de potencia máxima) de una celda fotovoltaica⁵. Este diagrama depende de la temperatura de la celda.

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} \quad (1.2)$$

Valores típicos de η , bajo las condiciones estándar, varían de 5% a 16% (cf. Tabla 1.a). La eficiencia del módulo está correlacionada negativamente con la temperatura, o sea, baja cuando la temperatura de las celdas aumenta, superando 25°C .

Similarmente se hablan de estos parámetros para un panel solar o una celda solar, ya que el panel es un ensamblaje en serie y/o paralelo de celdas solares. Por tanto la intensidad de la corriente que circula en el panel es la suma de las intensidades en las celdas conectadas en paralelo y la tensión del panel es la suma de la tensión en las celdas conectadas en serie.

Al aumentar la temperatura de una célula fotovoltaica empeora el funcionamiento de la misma: (4)

- Aumenta ligeramente la intensidad de corriente de corto circuito. En el panel de la Ilustración 1.h, aumenta de $+(0.065 \pm 0.015) \text{ } \%/^\circ\text{C}$
- Disminuye la tensión de circuito abierto. En el panel de la Ilustración 1.h, decrece de $-(80 \pm 5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$
- Disminuye el factor de forma, que es el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de corto circuito: $FF = \frac{V_M \cdot I_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$
- Disminuye el rendimiento. En el panel de la Ilustración 1.h, decrece de $-(0.5 \pm 0.05) \text{ } \%/^\circ\text{C}$

Se suele representar el punto óptimo de funcionamiento de una celda fotovoltaica en un dicho diagrama MPP (véase la Ilustración 1.i).



Ilustración 1.h: Etiqueta de características de un panel solar instalado en Alto Perú (5). $P_M = 95 \text{ W}$, $V_M = 20.92 \text{ V}$, $I_M = 4.54 \text{ A}$, $V_{OC} = 25 \text{ V}$, $I_{SC} = 4.85 \text{ A}$

⁵ http://www.zonnepanelen.wouterlood.com/solar_pages_uk/how_does_pv_work.htm

Se nota que la intensidad en la celda baja muy suavemente, hasta que la tensión llegue al valor de voltaje de potencia máxima, o sea hasta que la potencia se vuelva máxima. Más arriba de este punto de potencia máxima (MPP), la intensidad decrece de manera abrupta y por tanto la potencia también.

El punto de potencia máxima depende fuertemente de la temperatura de la celda fotovoltaica. Como se ve en la Ilustración 1.j, la variación de temperatura influye sobre todo el voltaje de circuito abierto (más temperatura, menos voltaje y por tanto menos potencia, y viceversa).

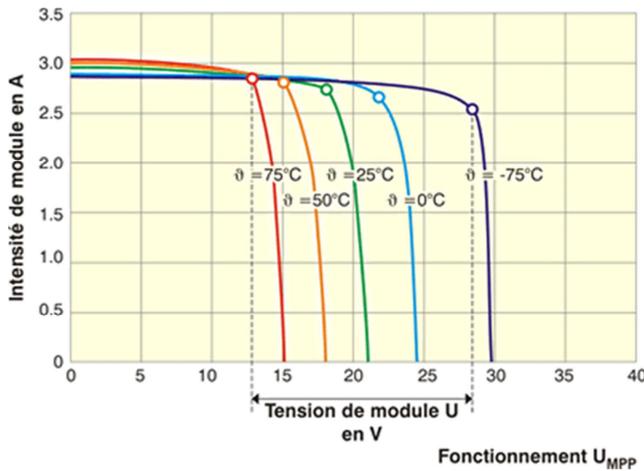


Ilustración 1.j: Curva intensidad-tensión en función de la temperatura⁶

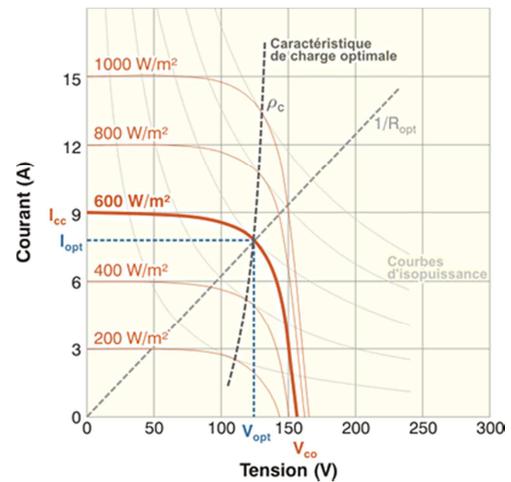


Ilustración 1.k: Curva intensidad-tensión en función de la irradiancia solar⁷

Por otra parte, depende mucho de la irradiancia solar (cf. Ilustración 1.k). Esta vez, la corriente de corto circuito aumenta proporcionalmente con la irradiancia, mientras que el voltaje de circuito abierto varía poco.

Las magnitudes que caracterizan una celda fotovoltaica y por tanto un panel fotovoltaico son:

- La potencia pico , o sea la potencia máxima
- El voltaje y la corriente de máxima potencia, anotados respectivamente y , cuyo producto es la potencia máxima:
- Voltaje de circuito abierto : definido cuando el panel está en circuito abierto. Por tanto la intensidad es nula.
- Intensidad de corriente de cortocircuito : definida cuando el panel está conectado a sí mismo. Por tanto el voltaje en sus bornes es nulo.

Estas magnitudes se representan en el diagrama de máxima potencia (cf. Ilustración 1.i).

- Rendimiento : cociente entre la máxima potencia y la insolación incidente sobre el panel (que es el producto de la irradiancia incidente estándar de 1000 W/m² por el área del panel). Actualmente, varía entre 5% y 16%.

La eficiencia de la celda fotovoltaica es fuertemente influida por la temperatura de la misma y la radiación solar que llega. La aumentación de la temperatura de la celda disminuye su rendimiento.

⁶ http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_16697.htm

⁷ *Ibid.*

2. Sistemas fotovoltaicos

Uno o varios paneles solares conectados constituyen un sistema solar o fotovoltaico. Según lo deseado, se pueden conectar varios paneles en serie (para aumentar el voltaje disponible) o en paralelo (para aumentar la intensidad de corriente disponible). A continuación notaremos el número de módulos fotovoltaicos en serie y el número de módulos fotovoltaicos en paralelo.

2.1. Sistema Fotovoltaico Domiciliario (SFD) o *Solar Home System (SHS)*

2.1.1. Componentes

Un Sistema Fotovoltaico Domiciliario (SFD) es un sistema fotovoltaico conllevando todos los componentes necesarios para hacer funcionar típicos aparatos de un hogar de manera autónoma.

2.1.1.1. Módulo fotovoltaico

La potencia del módulo fotovoltaico a instalar se calcula en función del uso previsto (cf. 0). Sin embargo, se puede precisar que esta potencia, para aplicaciones en hogares rurales aislados, varía en general entre 50 y 100 W, con valores extremos de 35 y 120 W.

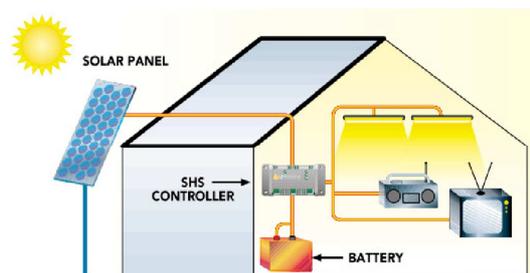


Ilustración 2.a: Esquema simple de un SFD (6)

2.1.1.2. Batería de acumuladores

El SFD estando dedicado a suministrar electricidad de manera autónoma, sin conexión a una red, se necesita un medio de almacenar la electricidad generada durante las horas de sol para que pueda estar empleada en la noche o en días nublados.

Por ello se necesita un acumulador de energía eléctrica, o batería recargable, que transforma de manera reversible la energía eléctrica en energía química para poder almacenarla.

2.1.1.2.1. Características y tipos de baterías

Diferentes conjuntos de elementos químicos pueden ser utilizados para fabricar baterías: plomo-ácido, níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-hierro (Ni-Fe), iones de litio (Li-ion), níquel-hidruro metálico (Ni-MH), etc. Las baterías de plomo-ácido están muy utilizadas porque permiten un amplio rango de aplicaciones y porque una buena relación calidad / precio; los sistemas fotovoltaicos no constituyen una excepción.

Una batería de plomo-ácido es un conjunto de varios acumuladores de plomo-ácido conectados en serie. Es caracterizada por:

- la capacidad: es la cantidad de corriente que puede entregar la batería en un número de horas determinado, a una temperatura de referencia (en general 25°C). La capacidad estándar está determinada descargando la batería con una corriente constante durante 10 horas, sin que la tensión disminuya debajo del límite de descarga; la capacidad se nota

C_{10} . En el caso de las aplicaciones fotovoltaicas, se habla en general de una capacidad de descarga en 20 o 100 horas, o sean respectivamente C_{20} o C_{100} . Se expresa en amperio-hora (Ah)⁸.

- la tensión nominal: depende del número de elementos de la batería. La tensión nominal de un acumulador de plomo-ácido es de 2 V. Entonces una batería clásica de 6 elementos tiene una tensión nominal de 12 V. La tensión en circuito abierto entre las bornes de la batería depende del estado de carga; para una batería de 12 V puede variar entre 11 y 12.6 V. Se considera que la batería está descargada si la tensión disminuye hasta 10.8 V (o sea, si la tensión de cada elemento alcanza 1.8 V). Al contrario, la tensión en carga es más elevada (13-14.5 V). Existen también baterías de 6 V, 24 V, 48 V y otros.
- la corriente máxima que puede entregar durante unos momentos (corriente de cresta).

Un fenómeno conocido como efecto Peukert muestra que descargar la batería con corrientes mayores disminuye la carga entregable de la batería. Por ejemplo, someter la batería a una corriente de 10 A no descarga la misma dos veces más que con una corriente de 5 A, sino un poco más (cf. Anexo A). (7)

Las características requeridas a la batería son las siguientes: (8)

- Capacidad mínima de carga según el dimensionamiento (cf. 2.4.4)
- Baja autodescarga, para evitar pérdidas de energía
- Poco o ningún mantenimiento (en este caso la batería está dicha “libre de mantenimiento”) para facilitar el manejo por usuarios que no disponen de una formación técnica
- Larga vida útil
- Alta eficiencia
- Operación posible en diferentes climas
- Bajo costo

Diferentes tipos de baterías de plomo-ácido pueden ser considerados: (9)

	Batería de automotriz			Baterías estacionarias ⁹	
<i>Abierta / sellada</i>	Baterías abiertas			Baterías selladas, reguladas por válvula (VRLA)	
<i>Tipo de batería</i>	B. de arranque	B. de automotriz mejorada	B. tubular estacionaria	B. tubular gelificada	Batería AGM
<i>Descripción</i>	Batería normal de carro. Electro líquido.	Electrolito líquido. Electrodo (placas) más gruesos que en la batería de carro.	Mucho electrolito.	Electrolito de tipo gel. Pueden montarse en cualquier posición.	Electrolito absorbido en fibra de vidrio. Pueden montarse en cualquier posición.

⁸ El amperio-hora es una unidad de carga eléctrica. La unidad de carga del Sistema Internacional (S.I.) es el culombio C. 1 Ah = 3600 C

⁹ A la diferencia de las baterías de arranque, utilizadas en carros, deben proporcionar una corriente continua de baja intensidad durante largos periodos, y poder descargarse sin dañarse.

Nivel máx. de descarga	30%	50%	50%	80%	80%
Autodescarga	10-20% / mes			< 3%	< 3%
Vida útil	2 a 3 años	1000-2000 ciclos con descarga de 15-20%	2500 ciclos con descarga 20%, 1200 ciclos con descarga de 50%. 10 años	10 años	
Características	Buen ratio capacidad / costo, fácilmente disponible, técnica sencilla, infraestructura de servicio. Pero funcionamiento no adecuado.		Precio elevado, escasa disponibilidad		
Mantenimiento	Echar agua destilada 1 a 2 veces al año para renovar el electrolito	Echar agua destilada 1 a 2 veces al año para renovar el electrolito	Echar agua destilada 1 vez al año para renovar el electrolito	No, pero cuidar el manejo	Verificar el nivel de electrolito después de unos años

Tabla 2.a: Tipos de baterías

Una descarga demasiado profunda se traduce por una sulfatación de la batería y la daño irremediablemente. La sobrecarga destruye el agua del electrolito y el nivel de éste baja rápidamente, agravando el desgaste de las placas.

La vida útil de una batería depende **críticamente** del manejo. Por una misma batería, la duración puede variar del simple al triple según la utilización. Entonces el regulador de carga es un componente muy importante, ya que protege la batería de sobrecargas y descargas profundas.

Es aconsejable no utilizar una batería de arranque de carro común (de plomo-ácido), porque en su uso común suele estar cargada completamente y entregar una corriente muy alta, pero durante muy poco tiempo, para el arranque del motor. Así se ve que el objetivo es diferente del almacenaje de electricidad en el contexto de un SFD. Una alternativa es de utilizar baterías de tipo arranque mejorado, que tienen placas más gruesas y más electrolito. No son selladas y requieren un mantenimiento bajo de 1 a 2 veces por año, consistiendo en echar agua destilada para renovar el electrolito. Las baterías de arranque mejorado permiten 1000 a 2000 ciclos de carga/descarga de 15 a 20 % cada uno y son más resistentes a las descargas de 50 % que las baterías normales de arranque.

En el caso de baterías tubulares gelificadas se liberan oxígeno y hidrógeno durante la reacción, que se recombinan en seguida si la intensidad y/o la tensión de carga no están demasiado elevadas, para volver a formar el gel. Si no se carga de manera correcta y que se libera gas, éste se pierde definitivamente. Como está sellada, no será posible renovar el electrolito, causando una reducción de la duración de la batería.

2.1.1.2.2. Influencia de la temperatura

Las baterías de plomo-ácido son normalmente diseñadas para operar a una temperatura de 25°C; cuando la temperatura aumenta, la capacidad en Ah se incrementa. Sin embargo, esto no significa

que a mayor temperatura se obtengan mejores resultados. De hecho, la aceleración de la reacción de oxidación-reducción en la batería provoca sulfatación, o sea corrosión interna por sulfato de plomo. Entonces un almacenamiento prolongado de una batería de plomo-ácido a temperaturas superiores a los 25°C acorta su vida útil. Además, al aumentar la temperatura de almacenamiento se genera un fenómeno de autodescarga; la tasa de autodescarga dobla cada incremento de 10°C de la temperatura. (10)

En climas calientes y húmedos con temperaturas mayores a los 30°C, se recomienda utilizar una batería abierta más que sellada, porque la humedad reduce la vida útil de la batería. Con baterías abiertas al menos se puede tratar de ver cuál es el problema. (11) (8)

2.1.1.2.3. Marcas y precios de baterías

Marca	País	Tipo	Precio
ETNA		Arranque (carro)	S/.200-300
RECOR		Arranque (carro)	S/.200-300
CAPSA	Colombia	Solar estacionaria abierta	S/.200
SONNENSCHNEIN	Alemania	Tubular gelificada	US\$ 500
BOSCH	Alemania	Libre de mantenimiento	
VARTRA			

Tabla 2.b: Ejemplos de marcas de baterías



Ilustración 2.b: Batería ETNA en Los Uros, Puno (12)

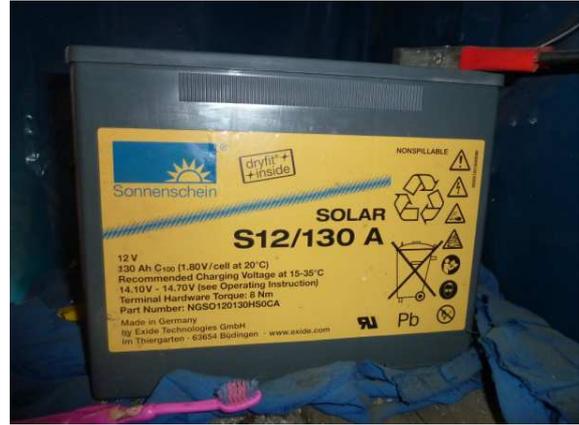


Ilustración 2.c: Batería solar Sonnenschein en Alto Perú, Cajamarca (5)



Ilustración 2.d: Batería estacionar CAPSA en El Alumbre, Cajamarca (13)

2.1.1.3. *Regulador de carga (o controlador)*

Este dispositivo electromecánico o electrónico, según el tipo de interruptor de control (si es electrónico, es un transistor), evita sobrecargas o descargas excesivas a la batería, puesto que los daños podrían ser irreversibles. Además debe asegurar que el sistema siempre trabaje en el punto de máxima potencia, o lo más cerca posible.

El señor Segundino Uanarino en Amantani, Puno, había conectado cargas directamente a la batería sin usar un regulador de carga. ¡Esta batería duró no más de 2 días!

La función principal de este componente es de controlar el estado de carga de la batería, asegurando así la vida útil de la misma:

- controla el nivel de carga y descarga de la batería,
- evita la sobrecarga de la batería, impidiendo el entregar de corriente desde el módulo FV a la misma cuando ya está cargada. Esto también asegura que el voltaje de la batería no esté mayor a lo permitido en los equipos conectados,
- evita la descarga profunda de la batería, cortando la entrega de corriente a las cargas de consumo cuando la batería ya alcanzó el límite bajo de voltaje,

Además facilita al usuario información básica sobre el estado del sistema: con este motivo dispone de uno a dos diodos indicando el estado de carga de la batería y el buen funcionamiento del conjunto, o de una pantalla digital (en este último caso podrá proporcionar más informaciones).

Tiene como características una tensión nominal que debe corresponder con la del sistema (12 V, 24 V...) y una intensidad nominal que ha de ser igual o superior a la intensidad de cortocircuito del conjunto de módulos fotovoltaicos.

A recordar...

El regulador:

- controla el nivel de carga o descarga de la batería,
- corta la entrega de corriente desde el panel a la batería si ya está cargada,
- corta la entrega de corriente desde la batería a las cargas del usuario.

Existen diferentes generaciones de reguladores:

2.1.1.3.1. Primera generación: reguladores con control en serie o paralelo

El control en serie o paralelo (*shunt*) corresponde a la posición del interruptor de control de generación. El regulador monitoriza constantemente la tensión de la batería y interrumpe la carga o la descarga cuando el voltaje alcanza los valores límites.

Función / Tipo de regulación	Serie	Paralelo (<i>shunt</i>)
Control de sobrecarga	Interrumpiendo la línea módulo FV-batería	Cortocircuitando el módulo FV
Control de descarga profunda	Interrumpiendo la línea batería-consumo	Interrumpiendo la línea batería-consumo
Descarga inversa de la batería hacia el módulo FV	Si el interruptor de control es electrónico, evita la descarga inversa	En todos casos es necesario un diodo interno que impida que el cortocircuito afecta a la batería y así también la descarga inversa
Disipación de potencia por el interruptor de control	No disipa potencia cuando está interrumpiendo la corriente de carga → adecuado para instalaciones de cualquier potencia	Disipa potencia cuando está cortocircuitando la corriente de carga → sólo para instalaciones de baja potencia
Caída de tensión en la línea módulo FV-batería	En funcionamiento normal, el interruptor de control genera una pequeña caída de tensión	En funcionamiento normal, el diodo interno genera una pequeña caída de tensión

Tabla 2.c: Funcionamiento de los reguladores en serie o en paralelo (14)

2.1.1.3.2. Segunda generación: reguladores de modulación de ancho de pulso

Los reguladores de ancho de pulso o PWM¹⁰ han permitido mejorar la recarga de las baterías de 70% (con los antiguos reguladores serie y paralelo) a 100% de la capacidad. El regulador entrecorta la corriente recibida del panel y la envía a la batería en forma de pulsos. Gracias a la lectura precisa de la tensión en las bornes de la batería, puede regular la frecuencia y la duración de los pulsos,

¹⁰ Pulse Width Modulation

realizando así la conexión y la desconexión de la batería y del módulo fotovoltaico de manera óptima. (15)

El precio varía de 3 a 5 euros por amperio. Ofrece una buena relación calidad / precio y de las tres generaciones es la más utilizada en SFD y SFC.



Ilustración 2.e: Regulador de marca Steca en Amantani, proyecto CER-UNI (12)



Ilustración 2.f: Regulador con caja de conexiones en el tablero de control, y contador de Ah, en Amantani, proyecto CER-UNI (12)



Ilustración 2.g: Regulador de marca Phocos en Alto Perú, Cajamarca (5)



Ilustración 2.h: Regulador de marca Steca en Yerba Buena Alta, Cajamarca (16)

2.1.1.3.3. Tercera generación: reguladores MPPT¹¹

En Alto Perú: (5)

¹¹ Maximum Power Point Tracking

Un módulo fotovoltaico está diseñado para producir una tensión superior a lo necesario, por diversas razones (temperatura, caídas de tensión), alcanzando 17 V o más para un panel dicho 12 V, mientras que la tensión de la batería varía entre 11 y 14.5 V. La tensión de los dos componentes nunca es la misma y es la batería que impone su tensión al resto del sistema. Entonces la potencia entregada por el panel es $P = V_{bat} \cdot I_M$, donde V_{bat} es la tensión de la batería; $V_{bat} < V_M$ y por tanto $P < P_M$ (la potencia máxima o pico); vemos que hay pérdidas de potencia debidas a la diferencia de tensión, que no son compensadas por un regulador de carga clásico.

En la Ilustración 1.h, el voltaje de máxima potencia alcanza 20.92 V, aunque la batería Sonnenschein de 12 V tiene una tensión de carga recomendada entre 14.1 y 14.7 V.

La reciente tecnología MPPT busca resolver este problema, permitiendo acercarse del punto de potencia máxima (cf. Ilustración 1.i). El regulador MPPT transforma las características de la corriente, para que se pueda entregar la potencia máxima, pero respetando los límites de la batería. En este sentido actúa como un transformador, “convirtiendo” la tensión del panel en corriente a entregar a la batería. Recibe del panel una corriente I_M con una tensión V_M ($I_M \cdot V_M = P_M$) y entrega a la batería una corriente I con la tensión V_{bat} de la batería, donde $I = \frac{P_M}{V_{bat}}$, manteniendo así la potencia máxima P_M . Como $V_{bat} < V_M$, $I > I_M$. El regulador debe entonces poder manejar corrientes mayores que la corriente de potencia máxima del panel.

Así mejora la eficiencia de la instalación fotovoltaica de 10 a 30%.

El costo del regulador MPPT es mucho más elevado que un regulador estándar, y en general no es necesario utilizarlo para pequeñas instalaciones, ya que las pérdidas de potencia no son muy importantes.

2.1.1.4. Inversor CC/CA

Es un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) almacenada en las baterías, por ejemplo de tensión 12 V en corriente alterna (CA), por ejemplo de tensión 220 V. En el mercado se encuentran en general inversores de onda sinusoidal pura o semisinusoidal.

En Alto Perú (Cajamarca), la ONG Soluciones Prácticas instaló SFD de potencia pico 95 Wp con inversores de onda modificada de 500 W, para satisfacer necesidades tipo TV, DVD, cargador, etc. y poder ahorrar en la compra de focos, que son más baratos en

CA. (5) (17)

La mayoría de los SFD no constan de un inversor, porque los pequeños aparatos a los cuales suministran electricidad se pueden conseguir funcionando con CC. Además, el inversor es un componente que induce pérdidas de eficiencia, los más eficientes ofreciendo un rendimiento de 90%; por tanto, en general no se puede considerar utilizar un inversor en sistemas con paneles de potencia pico 50 o 60 Wp. Sin embargo, para sistemas de potencia más elevada, alrededor de 100 Wp, es factible, pero no siempre recomendable, incluir un pequeño inversor; este permitirá facilitar la compra de cargas, porque a veces resulta difícil encontrar aparatos que funcionan en CC (radio, TV). Para potencias más grandes (2000 Wp) se vuelve ventajoso añadir un inversor. Para pequeñas potencias, la decisión de incluir o no un inversor se deberá entonces hacer según criterios económicos:

- Costo del inversor
- Pérdidas de energía inducidas por ello
- Menos pérdidas de energía por efecto Joule (cf. anexo D.4) en los cables, que es una ventaja si los cables son largos. De hecho, en CC (bajo voltaje), la corriente necesaria para hacer funcionar un aparato de misma potencia es mucho mayor que en CA, ya que la potencia es el producto de la tensión y de la intensidad (cf. anexo D.4).
- Disponibilidad de cargas en CC y precio de estos equipos, en comparación a las mismas cargas en CA. En general, los equipos CC son más caros.

Se debe notar que todos los aparatos portátiles (celulares, laptops) funcionan con corriente continua; en el comercio siempre se venden con cargadores CA porque se suponen que se van a recargar conectándolos a la red. En este caso, se puede considerar conseguir los cargadores que permiten conectarlos directamente a una pequeña instalación sin inversor. (15)

Por fin, la onda sinusoidal generada por el inversor puede ser de diferentes formas: senoide pura, semisenusoide o cuadrada. Algunos aparatos no soportan ondas cuadradas, mientras que la senoide pura, la más costosa, está adecuada para cualquiera. (15)



Ilustración 2.i: Inversor 12V CC/230V CA de marca Xantrex, potencia 500 W, en Alto Perú (5)

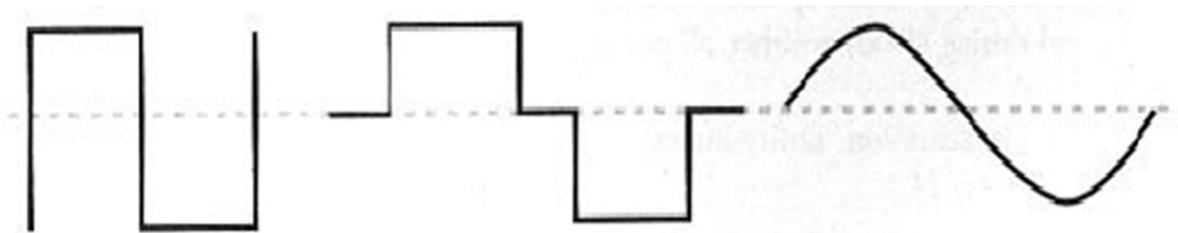


Ilustración 2.j: Diferentes tipos de ondas. De izquierda a derecha: cuadro, semisenusoide y senoide pura. (18)

- Inversores de onda cuadrada: son los más baratos, pero también son los menos eficientes. Producen demasiados armónicos que generan interferencias, o sea ruido. Pero si se necesita la corriente alterna únicamente para alimentar un televisor, una computadora o un aparato eléctrico pequeño, se puede utilizar este tipo de inversor. (3)
- Inversores de onda semisinusoide u onda sinusoidal modificada: son más sofisticados y caros que los inversores de onda cuadrada. Utilizan técnicas de modulación de ancho de impulso: el ancho de la onda es modificada para acercarla lo más posible a una onda sinusoidal. Generan menos armónicos. Ofrecen la mejor relación calidad / precio para la conexión de iluminación, televisores o variadores de frecuencia. (3)
- Inversores de onda sinusoide u onda sinusoidal pura: con una electrónica más elaborada se puede alcanzar una onda sinusoidal pura, pero naturalmente estos inversores se consiguen a un precio mayor. Actualmente existen en el mercado inversores sinusoidales con una eficiencia del 90% o más, dependiendo de la potencia. La incorporación de microprocesadores de última generación permite aumentar las prestaciones de los inversores con servicios de valor añadido como control remoto, medición de energía consumida, selección de batería, etc. (3)

2.1.1.5. Cargas

Sea sin o con inversor, en el ámbito de pequeñas instalaciones domiciliarias, se deben instalar cargas de baja potencia. Una carga es un aparato eléctrico que consuma energía. En cuanto a la iluminación, se recomienda utilizar focos ahorradores de tipo CFL¹² o LED¹³ y no lámparas incandescentes, que tienen un rendimiento muy bajo. Como se mencionó en el párrafo anterior, los aparatos portátiles funcionan todos en CC y en este caso se deberían buscar los cargadores correspondientes en CC.

Otros aparatos como televisor o radio se encuentran también funcionando en CC, aunque eso a veces resulta más difícil.

Aparatos comunes en hogares conectados a la red, como una licuadora, lamentablemente en general no pueden estar utilizados en el ámbito de SFD. Una licuadora (potencia 300 W), una refrigeradora (350 W) o una lavadora (500 W) necesitarían una corriente demasiado alta para poder funcionar.

Cargas	CC	CA
Focos ahorradores CFL o LED	Características típicas: 11 W, 12 V Marcas: AECA Solsum Precio variable : S/ .25-80	S/ .20-30
Radio	Radio de 12 V, 4 a 5 W	
TV	Pequeño TV en negro y blanco o ahora también en colores, de 12 V S/ .200	S/ .800

¹² Compact Fluorescent Lamp o Lámpara Fluorescente Compacta

¹³ Light-Emitting Diode o Diodo Emisor de Luz

DVD		
Cargador de celular	A conseguir a parte del celular	Común, vendido con el celular
Cargador de laptop	A conseguir a parte del laptop	Común, vendido con el laptop

Tabla 2.d: Cargas

2.1.1.6. Tablero de control y accesorios eléctricos

Para hacer las conexiones entre los diferentes componentes se necesitan cables, interruptores, fusibles, disyuntores diferenciales, etc. En inglés el conjunto de estos elementos es llamado BOS (*Balance Of System components*).

- Tablero de control: tablero donde están colocados el regulador, una caja de conexiones que sirve a conectar de manera limpia los diferentes componentes mediante cables, los fusos, los disyuntores...
- Cableado: para evitar pérdidas de potencia por efecto Joule, es mejor que los cables no sean muy largos, o sea que el panel esté cerca de las cargas. Si no, se deberá aumentar la sección de los cables. De hecho, la resistencia de un cable es proporcional a su largo e inversamente proporcional a su sección (cf. anexos D.2.1 y D.4). Otra alternativa es de aumentar la tensión nominal de las baterías para disminuir la intensidad de corriente circulando (cf. anexo D.4).
- Interruptores: mecanismo que permite conectar o desconectar los componentes, por motivos de seguridad o tareas de mantenimiento
- Desconectores: cada componente en un sistema debe ser capaz de desconectarse de todas las fuentes de energía.
 - Fusibles: los fusibles consisten en un hilo metálico o cable que se quemará cuando la corriente que pase a través del fusible exceda un máximo predeterminado, que abre el circuito para evitar que los cables se dañen (19). Una vez que un fusible se ha quemado, hay que reemplazarlo.
 - Interruptores diferenciales o disyuntores: los interruptores diferenciales, también llamados disyuntores, a diferencia de los fusibles, no necesitan ser reemplazados. Cuando la corriente excede el amperaje permitido por el diferencial, el circuito se abre y se detiene el flujo de corriente. (19)



Ilustración 2.k: Contador de Ah del CER-UNI en la isla de Amantani, Puno (12)

- Puestas a tierra: la masa, o tierra, limita el voltaje debido a tormentas, subidas de corriente o contactos con líneas de alta tensión. Además proporcionan una protección frente a derivaciones de descargas en personas.
- Contador o medidor: aparato que mide el consumo de energía, en Wh. También se pueden utilizar “contadores de Ah” que miden los Ah (carga) en vez de los Wh (energía).

2.1.2. Resumen

Componentes	Opcional?	Características
Módulo fotovoltaico	No	Diferentes tipos de silicio posibles que tienen diversas eficiencias y precios. Es el elemento más caro de la instalación.
Batería recargable	No	Existen diferentes tipos de baterías. Debe ser elegida tomando en cuenta el precio, la facilidad de mantenimiento, la duración, la disponibilidad en el mercado. Según el tipo, puede tener un costo importante.
Regulador de carga	No	Componente muy importante que protege la batería de sobrecargas y descargas profundas, permitiéndole alargar su vida útil.
Inversor	Si	Sirve a convertir la corriente continua almacenada en la batería en corriente alterna, si es necesario para hacer funcionar algunas cargas.
Cables, accesorios eléctricos	No	Sirven a unir los diferentes componentes entre ellos. Incluyen elementos de protección (fusibles o disyuntores, puesta a tierra).
Cargas	No	Consumen la energía producida por la instalación fotovoltaica. Existen aparatos funcionando con corriente continua y otros con corriente alterna.

Tabla 2.e: Componentes de un SFD

Según el tipo de material elegido, el costo de un SFD suele variar entre US\$ 700 y US\$1200.

2.2. Sistema Fotovoltaico Comunitario (SFC)

El SFC es similar a un SFD, pero para aplicaciones comunitarias o de pequeña industria, por ejemplo en una escuela o una posta de salud. Por tanto su tamaño es en general superior y tiende a constar de un inversor.

Puede suministrar un centro de carga de baterías, alimentar una pequeña refrigeradora para conservar vacunas en una posta de salud, computadoras en una escuela...

En chacras agrícolas puede suministrar ventiladores, cercas eléctricas, bombas de agua, bombas de aire (cría de peces)...

2.3. Sistema picofotovoltaico

2.3.1. Componentes

El desarrollo de sistemas picofotovoltaico es relativamente reciente. En principio, un sistema picofotovoltaico es un SFD miniaturizado. Entonces consta de los componentes siguientes:

- Panel fotovoltaico de silicio mono- o policristalino, cuya potencia en general no supera los 10 Wp,
- Batería(s): puede ser de tipo Li-Ion (que es el más adecuado), Ni-MH, Ni-Cd, Gel-Pb, SLA (plomo-ácido)
- Regulador de carga
- Cargas, que en general se resumen a una o varias lámpara(s) LED y, a menudo, un cargador de celular
- Cables y accesorios

Está adecuado sólo para aplicaciones en corriente continua; por tanto no conlleva un inversor.

Hoy en día existen en el mercado dos rangos de productos: (20)

- Sistemas móviles, de precio entre US\$ 30 y US\$ 100 (precios en el Perú)
- Sistemas estacionarios: son más caros que los sistemas móviles, con un precio de US\$ 100 a US\$ 250. Son modulares y pueden conllevar hasta 3 o 4 focos y un cargador de celular.

A diferencia del SFD, en general todos los componentes están integrados en el cuerpo del sistema, como un "kit". Pero en el caso de los sistemas estacionarios, la batería (con su regulador) puede estar un poco alejada de la lámpara.

Estas linternas fotovoltaicas proveen luz y, según el tipo de sistema, pueden alimentar pequeños aparatos eléctricos como radios, cargadores de celulares, reproductores de MP3, etc. Son lámparas LEDs que proporcionan la luz, que son componentes con muy buena eficiencia.

2.3.2. Estudio UNI / GIZ

En el Perú, es la GIZ la ONG que está impulsando esta tecnología. Firmó un convenio con la UNI¹⁴ para que ésta estudie 11 diferentes sistemas fotovoltaicos disponibles en el mercado y saque conclusiones sobre la calidad de los sistemas. El informe final (21) fue entregado en marzo del 2011.

Las lámparas son compuestas de LEDs (diodos emisores de luz) y varios sistemas incluyen una posibilidad de reglaje de la intensidad de iluminación, con 3 o 4 posiciones intermediarias. Pero algunos sistemas, como, en el estudio de la UNI, los de Fosera, el Suntransfer 10 y los de Barefoot, sólo tienen una posición. (21)

¹⁴ Universidad Nacional de Ingeniería

	Marca del sistema	Características	Buena calidad técnica (UNI)
Sistemas portátiles	PowerMundo / Nova	Panel 1.3 Wp; Batería SLA 6V, 1.3 Ah; 4 LEDs, 4 intensidades	
	Phocos ¹⁵	Baterías Ni-MH 5V, 2.1 Ah; 1 LED, 3 intensidades	X
	Cosmos	Panel 2.8 Wp; Baterías Ni-MH 3.6V, 2.05 Ah; 1 LED, 3 intensidades	
	Suntransfer 2	Panel 2 o 5 Wp; Batería Gel-Pb 6V, 4.5 Ah; 1 LED, 3 intensidades	
	Barefoot Fijo	Panel 1.5 Wp; Batería Li-Ion 3.2V, 1.5 Ah; 12 LEDs, 1 intensidad	
	Barefoot – Firefly 12	lámpara de escritorio con un campo de iluminación reducido Panel 1.5 Wp; Batería Ni-Cd 3.6V, 0.9 Ah; 12 LEDs, 3 intensidades	
Sistemas fijos	Sundaya ¹⁶ / Phaesun	Panel 3.6 Wp; Batería Li-Ion 7.4, 2.25 Ah; 12 LEDs, 3 intensidades	X
	Fosera 4200	Panel 2.5 Wp; Batería Li-Ion 3.2V, 4.2 Ah; 4 LEDs, 1 intensidad	X
	Fosera 7000	Batería Li-Ion 3.2V, 7 Ah; 8 LEDs, 1 intensidad	X
	Suntransfer 10	Casi un pequeños SFD: batería de plomo 12 V, 18 Ah, regulador, 4 LEDs	
	Barefoot Móvil	Panel 1.5 Wp; Batería SLA 12V, 5 Ah; 12 LEDs, 1 intensidad	

Tabla 2.f: Diferentes sistemas picofotovoltaicos estudiados por la UNI (20) (21)

Estos sistemas picofotovoltaicos funcionan generalmente con un panel de potencia pico inferior a 5 Wp y LEDs con varias intensidades de luz, cada una adecuada para usos diferentes; por ejemplo la intensidad más baja para ver a la persona con quien está hablando y la más alta para leer o hacer un trabajo preciso. (9)

Ventajas	Desventajas
<p>Es una solución de preelectrificación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • más barata que un SFD, • más fácil a mantener. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los focos deben estar conseguidos en el mismo proveedor • Ídem para la radio

Tabla 2.g: Ventajas y desventajas de un sistema picoFV en comparación con un SFD (20)

¹⁵ Empresa alemana que tiene una sede en Cochabamba, Bolivia

¹⁶ Empresa holandesa



Ilustración 2.l: Embalaje de la lámpara Phocos (12)



Ilustración 2.m: Lámpara Phocos cargándose (12)

Un sistema picofotovoltaico es un sistema fotovoltaico en reducción, que constituye una solución de preelectrificación. Tienen una potencia baja, inferior a los 10 W. Existen sistemas portátiles y otros estacionarios.

2.4. Definición de características

Los parámetros importantes a considerar para el diseño de un sistema fotovoltaico son:

- el suministro de energía: fuente solar,
- la demanda en energía, o sea el uso que será hecho de la electricidad.

Objetivos del diseño:

- asegurar que el suministro cumple con la demanda, en varias condiciones ambientales y económicas,
- maximizar la vida útil de los componentes. En los países en desarrollo en particular, las prioridades son la robustez del sistema y una duración larga.

Ya se pueden mencionar los puntos principales de la metodología:

- evaluación del recurso solar local,
- estimación de las cargas,
- selección del inversor,
- calculo del tamaño del panel,
- calculo del tamaño de la batería.

2.4.1. Medidas físicas: estimación de la insolación local

La fuerza del sol que llega a la Tierra equivale 10000 veces del consumo mundial de energía.

Como los parámetros de paneles fotovoltaicos están definidos por una irradiancia de 1000 W/m^2 , los mapas de irradiancia solar con vistas de diseño fotovoltaico proporcionan el dato llamado “horas de sol máximo” en promedio por día (o más frecuentemente en inglés *peak sun hours – PSH*). La irradiancia a lo largo del día puede ser aproximada por una curva de Gauss: la irradiancia es débil en la salida del sol, crece hasta el medio día (en este momento, según el lugar, puede alcanzar valores superiores a los 1000 W/m^2) y luego decrece hasta la puesta del sol (cf. Ilustración 2.n). Las horas de sol máximo corresponde al número de horas de irradiancia reducida a valor estándar de 1000 W/m^2 .

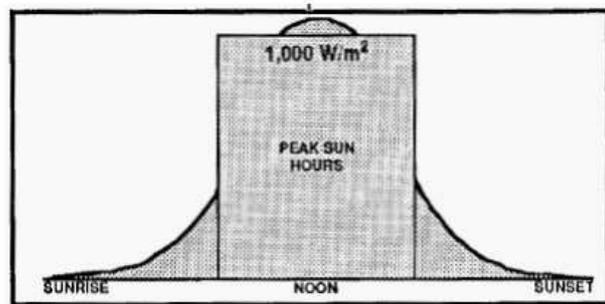


Ilustración 2.n: Horas de sol máximo diarias (*peak sun hours*) (6)

Los mapas regionales (cf. Ilustración 2.o) proporcionan una buena aproximación de las horas de sol máximo, pero no se debe desatender recurrir a datos locales más precisos ante organismos meteorológicos cuando sea posible.

La insolación solar contiene diferentes formas de radiación:

- Radiación directa del sol: la más eficiente. Toca directamente a una superficie.
- Radiación solar reflejada: toca primero otra superficie antes de llegar a la superficie considerada. Así la radiación total más fuerte se produce cuando hay nubes alrededor del sol (pero no delante de él).
- Radiación solar difusa: la radiación pasa primero por nubes o neblina.

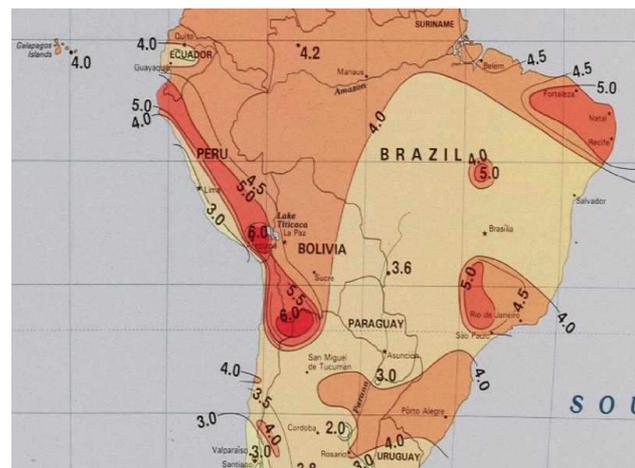


Ilustración 2.o: Mapa de horas de sol máximo en una parte de América del Sur

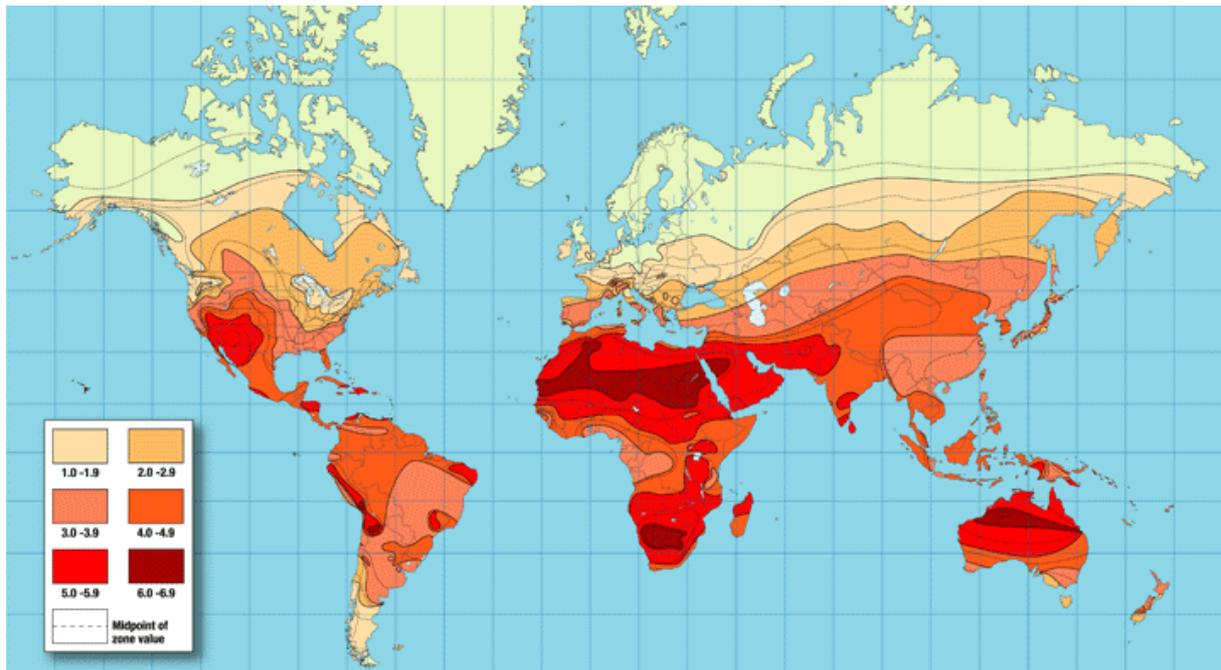


Ilustración 2.p: Mapa de horas de sol máximo en el mundo¹⁷

Para evaluar la radiación solar, se suele hablar de las horas de sol máximo PSH (*peak sun hours* en inglés). En un lugar definido, es el número de horas por día presentando una irradiancia de 1000 W/m^2 , equivalente a la insolación total en un día en este lugar.

La radiación solar puede tener diversas formas: radiación directa, reflejada, difusa. Por tanto, en días nublados hay también radiación solar, aunque mucho menor que en días soleados.

2.4.2. Estimación de las cargas

Un sistema fotovoltaico funciona en un ciclo diario: genera electricidad durante las horas de sol, que es almacenada por acumuladores y que se puede así utilizar durante las horas oscuras. Por tanto se suele hacer un balance diario, en condiciones exteriores más desfavorables (irradiancia en los días los menos insolados del año), para dimensionar el sistema.

Intuitivamente se realizaría un balance energético, o sea en Wh/día. Pero como el voltaje de la batería varía al largo del día según el estado de carga o descarga de ésta, se ve más conveniente hacer un balance de carga (Ah/día). Haciendo eso, se evitarán errores de estimación debidos a la variación de la tensión de funcionamiento del sistema, impuesta por la batería.

Para hacer el dimensionamiento se debe considerar el mes o el periodo del año más desfavorable en términos de relación carga / irradiancia solar. Así se asegurará que se tendrá electricidad en todos los meses del año. También hay que definir el número de días de autonomía de la instalación, por tanto de la batería, en función de las características climáticas de la zona y del uso de la instalación.

Primero hay que hacer una lista de las cargas que se van a utilizar. Para ello es más fácil utilizar tablas, diferenciando las cargas trabajando en CC de las trabajando en CA:

¹⁷ http://1.bp.blogspot.com/_YKPBjvALc2o/ShgPFBtOcsi/AAAAAAAABEc/eil4IKm1184/s1600-h/world_insolation_map_04.gif

A	B	C	D	E	F	G
Carga CC	Unidades (u.)	Potencia unitaria (W)	Potencia total (W)	Horas diarias de uso (h)	Energía / día (Wh)	Carga / día L_{CC} (Ah)
Tipo de carga: foco, TV, etc.	Nº de u. de la carga, ej. 3 focos	Potencia de 1 carga CC	(B)*(C)	Nº de horas de uso de las cargas / día	(D)*(E)	(F) / V_n
TOTAL					Total Wh	Total Ah

Tabla 2.h: Cálculo de la carga diaria trabajando en CC, L_{CC} . V_n es la tensión nominal del sistema, en general 12 V.

A	B	C	D	E	F	G
Carga CA	Unidades (u.)	Potencia unitaria (W)	Potencia total (W)	Horas diarias de uso (h)	Energía / día (Wh)	Carga / día L_{CA} (Ah)
Tipo de carga: foco, TV, etc.	Nº de u. de la carga, ej. 3 focos	Potencia de 1 carga CA	(B)*(C)	Nº de horas de uso de las cargas / día	(D)*(E)	(F) / V_n
TOTAL					Total Wh	Total Ah

Tabla 2.i: Cálculo de la carga diaria trabajando en CA, L_{CA} . V_n es la tensión nominal del sistema, en general 12 V.

Claramente se pueden también combinar estas tablas para hacer algo fácil a utilizar con un programa de hojas de cálculo.

Para poder utilizar cargas trabajando en CA, se necesita un inversor CC/CA; este componente tiene una eficiencia inferior a 1, notada η_{inv} . Finalmente, la carga diaria L a suministrar por el sistema fotovoltaico se calcula tomando esta eficiencia en cuenta:

$$L = L_{CC} + \frac{L_{CA}}{\eta_{inv}} \quad (2.1)$$

Se puede aumentar esta carga tomando un margen de seguridad del orden del 15%, que corresponderá a las pérdidas en los cableados y las conexiones, a las variaciones en los consumos previstos inicialmente, etc.

2.4.3. Cálculo del tamaño del módulo fotovoltaico

El número de módulos fotovoltaicos en total viene dado por la ecuación:

$$N = N_p * N_s \quad (2.2)$$

Donde N es el número total de módulos fotovoltaicos, N_p el número de módulos fotovoltaicos en paralelo y N_s el número de módulos fotovoltaicos en serie.

$$N_p = \frac{V_n}{V_{nfv}} \quad (2.3)$$

Con V_n la tensión nominal de la instalación (de la batería) y V_{nfv} la tensión nominal del módulo fotovoltaico.

$$N_s = \frac{L}{I_M \cdot h_{ps}} \quad (2.4)$$

Con L la carga real diaria (Ah), I_M la intensidad de potencia máxima del tipo de módulo fotovoltaico considerado (A) y h_{ps} la irradiancia diaria en promedio mensual expresada por el número de horas de sol máximo o *peak sun hours* (h).

2.4.4. Cálculo del tamaño de la batería

Para el dimensionamiento de la batería o del conjunto de baterías es necesario estimar el número de días de autonomía d requerido, que corresponderá con el número de días seguidos sin sol que pueden darse en el lugar de ubicación de la instalación. La capacidad C de la batería se expresa en Ah por:

$$C = \frac{L \cdot d}{p_d} \quad (2.5)$$

Con p_d la profundidad de descarga de la batería autorizada. Este parámetro depende del tipo de batería utilizado (véase el §2.1.1.2).

En el Perú se suele tomar como valor de d entre 3 y 5 días.

Según el valor de capacidad encontrado, se puede considerar utilizar varias baterías conectadas en paralelo. Por ejemplo, una capacidad de 200 Ah puede ser alcanzada mediante dos baterías de 100 Ah cada una, conectadas en paralelo.

2.4.5. Dimensionamiento del regulador de carga

Un regulador de primera o segunda generación (cf. §0) debe poder manejar una intensidad de corriente igual a la intensidad de cortocircuito del o de los módulos fotovoltaicos. Entonces:

$$I_{mreg} = N_p \cdot I_{SC} \quad (2.6)$$

Donde I_{mreg} es la intensidad máxima a soportar por el regulador, N_p el número de módulos fotovoltaicos conectados en paralelo y I_{SC} la intensidad de cortocircuito de un módulo fotovoltaico.

En el caso de los reguladores de tercera generación, los reguladores MPPT, no se debe utilizar esta expresión, ya que justamente el regulador MPPT aumenta la intensidad a entregar a la batería.

$$I_{mMPPT} = N \cdot \frac{P_M}{V_{mbat}} \quad (2.7)$$

Donde N es el número total de paneles, P_M la potencia pico de un panel y V_{mbat} la tensión mínima a la cual puede llegar la batería descargada.

2.4.6. Selección del inversor (en caso sea necesario)

Si se ve necesario suministrar energía eléctrica en corriente alterna (CA), habrá que equipar la instalación de un inversor CC/CA (invirtiendo la corriente continua en corriente alterna).

Para conocer la potencia nominal del inversor a instalar, ha de hacer una lista de las cargas que trabajarán en CA y de adicionar sus potencias (W); se escogerá la potencia nominal del inversor como

ligeramente superior a ésta, pero la más cercana posible. No conviene sobredimensionarla, porque el inversor es menos eficiente cuando trabaja a un porcentaje bajo de su capacidad. (3)

La tensión de entrada del inversor debe ser igual a la tensión nominal del sistema. En cuanto a las características de salida, deben corresponder a lo indicado sobre las cargas (una tensión de 220/230 V y una frecuencia de 50 o 60 Hz son comunes).

Un inversor consume una parte de la electricidad que invierte, lo que es caracterizado por su eficiencia o rendimiento. La eficiencia del inversor η_{inv} varía entre 0.8 y 0.95, el valor de 0.9 siendo considerado como una buena eficiencia. Además, la mayoría de los inversores gastan energía también cuando no están funcionando; pero en general los inversores adecuados a pequeñas instalaciones fotovoltaicas son equipados de un interruptor que permite apagarlos. Existen también aparatos que combinan la función del regulador con la del inversor.

El dimensionamiento de la instalación fotovoltaica está basada en la estimación de las cargas que estarán usadas y en el recurso solar (horas de sol máximo) disponible en el lugar considerado.

2.5. Normas técnicas

Los componentes de un SFD o SFC deben ser diseñados y fabricados según las normas o estándares siguientes: (22)

- IEC-61215, *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules; Design Qualification and Type Approval, April 1993.*
- IEEE, *Standard 1262, Recommended Practice for Qualification of Photovoltaic (PV) Modules, April 1996.*
- Norma Técnica Universal para Sistemas Fotovoltaicos Domésticos – versión 2, Thermie B SUP 995-96, EC-DGXVII, 1998, versión 2; traducción del inglés *Universal Technical Standard for Solar Home System, version 2.* (23)

Además la DGER/MEM publicó reglamentos técnicos sobre la configuración técnica de los sistemas fotovoltaicos y sobre procedimientos de evaluación. (24) y (25)

Para sistemas picofotovoltaicos, existen especificaciones establecidas por el ESMAP¹⁸, una empresa conjunta entre la UNDP y el Banco Mundial: *Portable Solar Photovoltaic Lanterns: Performance and Certification Specification and Type Approval, August 2005* (26).

¹⁸ Energy Sector Management Assistance Program

3. Instalación

3.1. Instalación del panel fotovoltaico

Se recomienda que la instalación sea hecha por especialistas, para garantizar una instalación de calidad, de eficiencia optimizada. El módulo fotovoltaico se instala sobre un techo o un poste; el panel no debe ser colocado directamente sobre un techo de metal, que generara una alta temperatura.



Ilustración 3.a: Panel solar sobre un poste cerca de la vivienda en Alto Perú, Cajamarca (5)



Ilustración 3.b: Panel solar sobre un techo en Campo Alegre, Cajamarca (16)



Ilustración 3.c: Panel solar sobre un techo en la isla de Amantani, Puno (12)



Ilustración 3.d: Panel solar montado en un poste en Los Uros, Puno (12)

Lo importante es de orientar e inclinar el panel solar de manera óptima, para poder maximizar el valor de la irradiancia solar llegando a la superficie del panel (ya que la potencia máxima que puede generar el panel está definida en condiciones óptimas que incluyen entre otros una irradiancia de 1000 W/m^2 llegando con una incidencia perpendicular). Así, en el hemisferio sur, debe estar orientado al norte geográfico (al revés en el hemisferio norte). La inclinación del panel hay de corresponder a la latitud del lugar (para corregir ella misma) $\pm 15^\circ$ (si se quiere favorecer la generación de electricidad en verano/invierno).

El panel fotovoltaico capta el máximo de energía solar cuando está perpendicular a los rayos solares. Pero el ángulo de incidencia de estos rayos varía a lo largo del día y también a lo largo del año (en invierno, el sol está más “bajo” que en verano). Existen dispositivos de soporte que siguen la posición del sol, pero son muy costosos y faltan de robustez. Por tanto, al momento de orientar el panel solar, se escoge en general de favorecer la producción de energía en el mes menos soleado, orientando el panel hacia el norte en el hemisferio sur y hacia el sur en el hemisferio norte.

Para que el panel esté perpendicular a los rayos del sol, se debe también inclinar de manera adecuada, hacia el norte en el hemisferio sur y viceversa en el hemisferio norte:

Latitud (en valor absoluto)	Inclinación
0°-15°	15°
15°-22.5°	Latitud + 5°
22.5°-35°	Latitud + 10°
35°-50°	Latitud + 15°
> 50°	Latitud + 20°

Tabla 3.a: Inclinación idónea del panel (27)

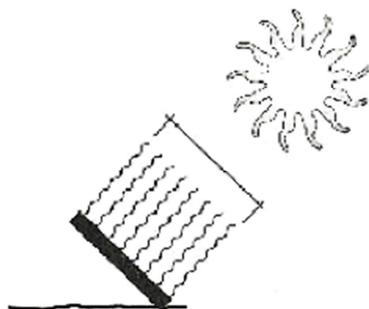


Ilustración 3.e: Ángulo óptimo del panel relativamente a los rayos solares (más luz llega) (18)

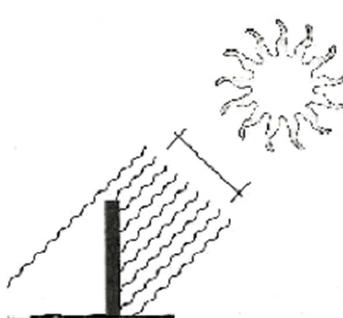


Ilustración 3.f: Ángulo malo (posición vertical), menos luz llega (18)

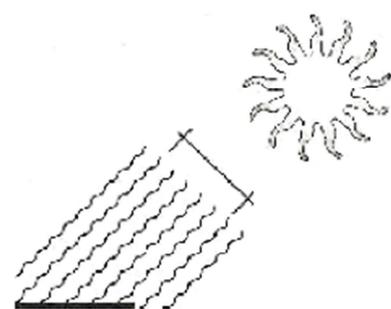


Ilustración 3.g: Ángulo malo (posición horizontal), menos luz llega (18)

Se debe evitar cualquier objeto que podría engendrar sombra (tanto en el momento de la instalación como más tarde). La estructura de los módulos fotovoltaicos tiene conexión a tierra, lo que impide que se dañen por la caída de un rayo.

El panel solar se debe orientar e inclinar de manera correcta, de manera a optimizar el aprovechamiento de la radiación solar.

3.2. Instalación de los otros elementos

Para la instalación de la batería se debe buscar un lugar de temperatura templada y bien ventilado, evitando lugares fríos. En el caso de temperaturas bajo de cero, la resistencia interna de las baterías aumenta mucho. (3)

Se recomienda aislarla de la humedad, no poniéndola directamente en el suelo sino sobre una mesita o placa de madera. Se debe proteger de la radiación solar directa.

Si hay un inversor, se recomienda también ponerlo sobre madera para que esté aislado.



Ilustración 3.h: Batería en caja de madera, unida al regulador, en Yerba Buena Alta, Cajamarca (16)



Ilustración 3.i: Inversor sobre soporte de madera en Alto Perú, Cajamarca (5)

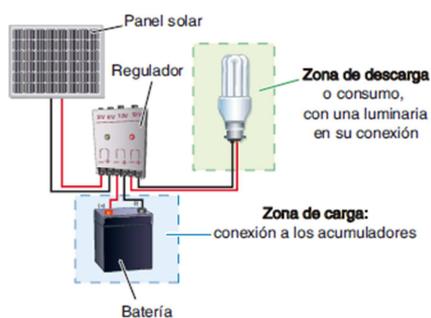


Ilustración 3.j: Esquema de conexiones sin inversor (28)

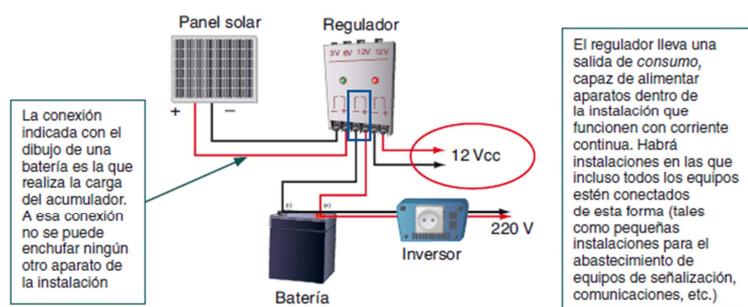


Ilustración 3.k: Esquema de conexiones con inversor (28)

Es mejor que la instalación sea hecha por especialistas, para tener buenas conexiones y así limitar la probabilidad de ocurrencia de problemas y también riesgos eléctricos. Si se desea medir el consumo, se puede añadir un medidor o contador.

4. Operación, mantenimiento y reemplazo

4.1. Operación

La operación de un sistema fotovoltaico es sencilla. El usuario no tiene mucho que hacer a parte de entender las indicaciones del regulador de carga y de no tratar de forzar el uso de la batería si el regulador le indica el contrario. Los reguladores más simples dan las indicaciones mediante LEDs de colores. Por ejemplo en la Ilustración 4.a, el diodo verde arriba indica que todo está en buen funcionamiento, mientras que los tres diodos en un dibujo de batería señalan el estado de carga de la misma; en la Ilustración 4.a, el LED más arriba está prendido, lo que significa que la batería está cargada.

Si un inversor está incluido en la instalación, se debe apagar cuando no sirve, porque si no continuará a gastar energía.

En las instalaciones fotovoltaicas en Alto Perú, las familias han bien entendido que debían apagar el inversor cada noche. (5)

Es importante que el usuario entienda que el panel solar no atrae a los rayos (16). De todo modo, tiene una protección contra ellos, su estructura estando conectada a la tierra.

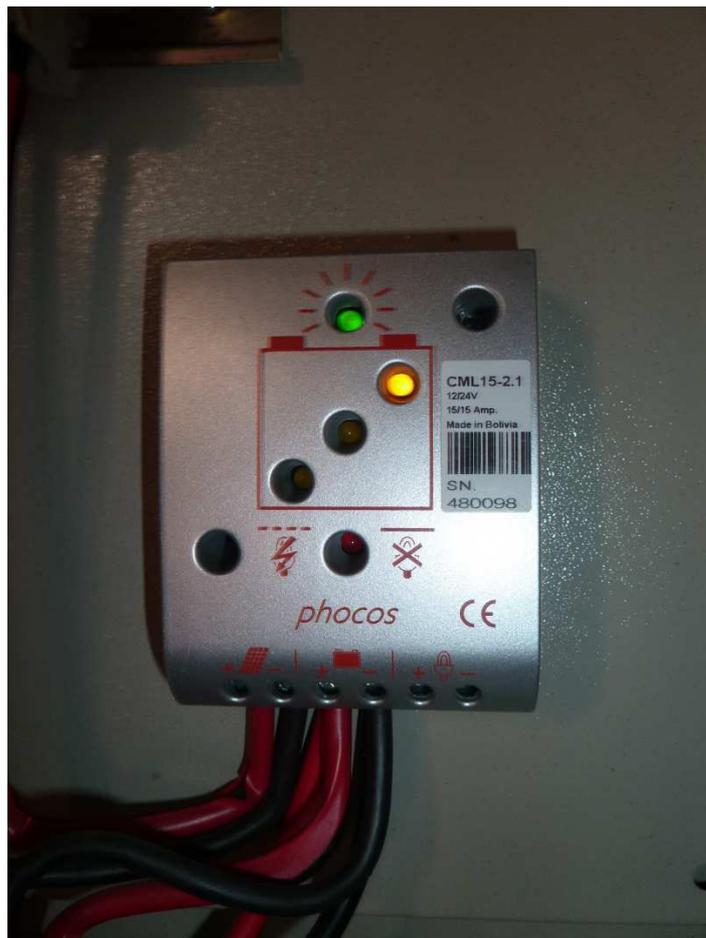


Ilustración 4.a: Regulador Phocos en Alto Perú. LED verde: buen funcionamiento. LED amarillo 1: batería cargada. (5)

4.2. Mantenimiento

4.2.1. Mantenimiento de los módulos fotovoltaicos

Como no contienen partes móviles y que las celdas fotovoltaicas y conexiones internas están encapsuladas en material protector, los módulos fotovoltaicos necesitan muy poco mantenimiento. Sólo es necesario limpiar la superficie de los módulos, ya que la acumulación de polvo baja la eficiencia, pero en general la lluvia se encarga de hacerlo; en estaciones secas, sólo emplear agua y un detergente no abrasivo cada dos semanas, sobre todo si el panel solar se encuentra en el techo cerca de la chimenea, cuyo humo lo ensucia rápidamente. Además conviene inspeccionar las conexiones entre los paneles y el regulador una o dos veces al año, para asegurarse que estén ajustadas y libres de corrosión. El usuario debe cerciorarse de que ningún obstáculo venga poner el panel en sombra; así se deben cortar las ramas de árboles creciendo cerca de la instalación solar (se deberá verificar que eso no planteará problemas culturales).

Se debe aseverar que la estructura de soporte del panel esté en buenas condiciones. En caso de que ésta no se encuentre protegida contra las inclemencias, es decir, que no sea de aluminio, acero inoxidable o galvanizado, se recomienda darle tratamiento con pintura antióxido. (22)

4.2.2. Mantenimiento del regulador de carga

El regulador necesita poco mantenimiento, pero es importante que funcione bien, porque protege la batería, alargando su vida útil. (3) (29)

- Se debe observar visualmente del estado del regulador y su funcionamiento. Con un voltímetro y amperímetro se pueden verificar los valores de tensión y de intensidad de corriente, que dan un índice del comportamiento de la instalación. Si detecta ruidos anormales, contacte al personal especializado.
- Mantenga el controlador de carga colocado en posición correcta, lugar limpio, seco y protegido de los rayos solares.
- Verifique que las conexiones y el cableado estén correctos y bien apretados.
- Chequee que el fusible de entrada esté en buen estado.

4.2.3. Mantenimiento de la batería

La batería es el componente de la instalación que requiere más atención. Su duración depende de manera crítica de su manejo.

Primero se debe verificar que la batería esté en un local ventilado y que se encuentra protegida de los rayos solares. Además se debe cerciorar de que la estructura de soporte de la batería esté bien segura y en buen estado. (29)

En cuanto al electrólito, si el modelo de batería instalado es libre de mantenimiento, normalmente no hay ninguna tarea que hacer.

Pero si se trata de una batería abierta, se debe una a dos veces al año añadir agua destilada para renovar el electrolito; el nivel de lo mismo se debe mantener entre las marcas “mínimo” y “máximo” indicadas, y si no hay estas marcas, el nivel de electrolito adecuado es entre 10 y 12 mm por encima del protector de separadores. Nunca se debe rellenar con ácido sulfúrico sólo, sino con agua destilada o también agua preparada, que es una mezcla en proporciones iguales de agua destilada con ácido sulfúrico (12). Como último recurso se puede también utilizar agua de lluvia, pero esa no debe entrar en contacto con metales, para que no adquiera impurezas; así, por ejemplo se puede recoger por un techo de tejas cerámicas o por una lona impermeable. Además, si la ubicación del panel está sujeta a lluvias ácidas, no es recomendable usar agua de lluvia.

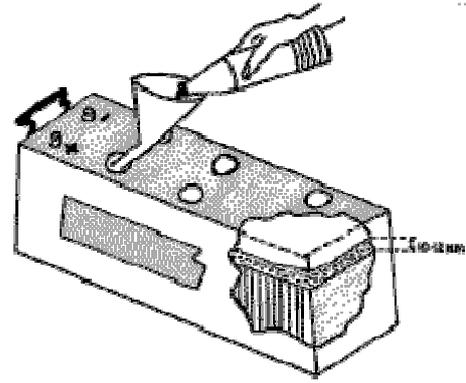


Ilustración 4.b: Añadido de agua destilada para mantener el nivel de electrolito (29)

Si se dispone de un densímetro, se puede medir la densidad del electrolito, que debe ser de 1240 ± 0.01 g/L a 20°C cuando la batería está cargada.

Al realizar estas operaciones se comprueba el estado de los bornes de la batería, que se limpian de posibles depósitos de sulfato. Los bornes deben estar bien apretados. Además se recomienda limpiar la cubierta superior de la batería y cubrir de vaselina neutra, o grasa antioxidante, todas las conexiones, para evitar la sulfatación. (3) (29)

- Causas frecuentes de sulfatación de una batería: (3)
 - Dejarla descargada durante mucho tiempo,
 - Añadir ácido puro al electrolito,
 - Sobrecargas demasiado frecuentes,
 - Haber esperado demasiado antes de añadir agua destilada al electrolito,
 - Traspase del electrolito de unos vasos a otros.
- Síntomas de sulfatación de un elemento de la batería: (3)
 - El densímetro registra siempre una densidad baja del electrolito, a pesar de que el elemento siempre se somete a la misma carga que los otros elementos,
 - La tensión es inferior a la de los demás elementos durante la descarga y superior durante la carga,
 - Es imposible cargar la batería a toda su capacidad,
 - Las dos placas, positiva y negativa, tienen un color claro,
 - En casos extremos, uno de los terminales sobresale más de lo normal debido a la deformación de las placas.
- Riesgos y precauciones al manipular la batería: (29)
 - Riesgos del electrolito: el electrolito es ácido diluido, por tanto puede causar irritaciones, incluso quemaduras, en la piel y los ojos. Si el electrolito entra en contacto con los ojos, se deben enjuagar inmediatamente con abundante agua durante un minuto, manteniendo los ojos abiertos. Si el contacto es con la piel, lave inmediatamente con abundante agua la zona afectada. En ambos casos,

después de esta primera acción neutralizadora, consulte rápidamente un médico.

- Riesgos eléctricos: la batería puede presentar riesgos de cortocircuitos, que generarían alto voltaje. Se recomienda al manipularla observar las siguientes reglas:
 - Quítese relojes, anillos, cadenas u otros objetos metálicos de adorno personal que pudieran entrar en contacto accidentalmente con los bornes de la batería de acumulación.
 - Siempre que las necesite, use herramientas con mangos aislados eléctricamente.
- Riesgos de incendio: las baterías presentan riesgos de explosión y por consiguiente de incendio, debido a que generan hidrógeno. Se recomienda lo siguiente:
 - Proporcione una buena ventilación en el lugar de ubicación de la batería de acumulación para evitar acumulación de gases explosivos.
 - No fume en el área donde está ubicada la batería de acumulación ni prenda chispas para observar el nivel del electrolito.
 - Mantenga el área de la batería de acumulación fuera del alcance de llamas, chispas y cualquier otra fuente que pueda provocar incendio
 - No provoque chispas poniendo en cortocircuito la batería para comprobar su estado de carga, pues también puede provocar explosión.

4.2.4. Mantenimiento del inversor

- Verifique que el área de ubicación del inversor se mantenga limpia, seca y bien ventilada.
- Asegúrese de que el inversor esté protegido de los rayos solares.
- Compruebe que el inversor funciona adecuadamente y que no se producen ruidos extraños dentro de él. En caso de que la operación sea defectuosa o no funcione, contacte al personal especializado.

4.2.5. Mantenimiento de equipos consumidores y cableados

- De manera general se debe comprobar que no haya terminales flojos ni rotos, que las conexiones estén bien apretadas y que los conductores se hallen en buenas condiciones. Verifique que todos los empalmes y conexiones estén fuertemente apretados para evitar falsos contactos, y protegidos adecuadamente con cinta aislante. (29)
- El mantenimiento de los equipos consumidores (radios, televisores, refrigeradoras, computadoras, etc.), es el mismo que se le hace a éstos cuando funcionan conectados a la red nacional. (29)
- En el caso de la refrigeradora, se ubica en un lugar bien ventilado para garantizar un uso más eficiente y por tanto no debe cambiarlo de lugar sin la consulta del especialista.

- Se deben limpiar los focos si se encuentran en un entorno donde hay mucho polvo (cocina, granja...) para que la luz que proporcionan no sea velada (16).

Si un componente del sistema no funciona adecuadamente y su solución está fuera de las acciones que se han establecido en el manual básico, el usuario debe contactar con el personal especializado. No debe acudir a personas no autorizadas ni tratar sí mismo de solucionar el problema. Con esta medida se evitan accidentes y daños a la instalación. (29)

4.2.6. Otras recomendaciones (29)

- Desconecte los equipos electrodomésticos en los días de tormentas eléctricas fuertes y ciclones para evitar que una descarga atmosférica pueda averiarlos.
- No conecte al sistema equipos electrodomésticos o de otro tipo que no hayan sido considerados en el diseño, sin consultar a los especialistas, ya que una sobrecarga por consumo excesivo puede provocar su mal funcionamiento.
- No permita que otros usuarios se conecten a su instalación (no hacer tendederas).
- No conecte equipos de potencia superior a la del inversor CC/CA, pues esta sobrecarga puede dañarlo.
- Almacene el agua destilada en recipientes plásticos o de cristal; siempre que vaya a añadir agua destilada a la batería de acumulación, use también embudo de plástico o cristal (en ningún caso emplee recipientes metálicos).
- Una vía para recolectar agua destilada es en los días de lluvia. Una vez que comience a llover, espere de 10 a 15 minutos y luego coloque un recipiente abierto, de plástico o cristal, al aire libre. Nunca recolecte agua de techos, canaletas y otros medios.
- No utilice, en sustitución del agua destilada para rellenar la batería de acumulación, agua de río, hervida u otro tipo que no sea la recomendada, ya que esto daña la vida útil de la batería de acumulación.
- Fíjese regularmente en los indicadores lumínicos del controlador de carga y en caso de notar que alguno de ellos no enciende, contacte inmediatamente al personal especializado.
- Si alguna lámpara no enciende y el tubo fluorescente no está fundido ni defectuoso, revise tanto el fusible (si lo tiene) como el interruptor. Si alguno está defectuoso, reemplácelo por otro.
- Recuerde siempre que en los sistemas fotovoltaicos, como la energía es limitada, se hace mucho más necesario el ahorro al máximo. Por tanto, no mantenga luces o equipos encendidos innecesariamente.

4.3. Reemplazo

La vida útil de un panel solar es del orden de 20 a 30 años. Va normalmente protegido con vidrio templado, lo que permite aguantar condiciones meteorológicas difíciles como hielo, abrasión, cambios bruscos de temperatura o granizo. La fabricación de los paneles solares es costosa; en Europa, existen empresas especializadas en el reciclaje de módulos fotovoltaicos, aunque pocas, que permiten recuperar hasta 90% de los materiales.

La duración de la batería depende mucho del tipo (cf. §2.1.1.2.1); puede variar entre 2 años para baterías de arranque y 8 a 10 años para unos tipos de baterías estacionarias. En el Perú, no hay ningún sistema de reciclaje para las baterías en fin de vida. Sólo se podría organizar que las baterías estuvieran llevadas a un centro técnico. Ahora en los proyectos de gran tamaño se pide a los fabricantes que recomienden algo para las baterías en fin de vida (11). Al comprar de una nueva batería, si es de arranque, se debe verificar que realmente sea una batería nueva, y no una usada vendida como nueva, como lo señaló un usuario en la isla de Taquile (12).

Un inversor dura al menos 5 años.

Los fusibles deben ser reemplazados cuando se queman. En el terreno se constató que varias veces eso no era el caso; pero si ocurre otra vez una sobrecorriente, sin fusibles ella dañará los componentes del sistema fotovoltaico.

Conclusión

Un sistema fotovoltaico domiciliario, o comunitario (que es en general de tamaño un poco más grande) es un sistema autónomo de generación de electricidad, que utiliza la energía luminosa del sol para producir energía eléctrica que será almacenada en baterías para una utilización simultánea o diferida.

La tecnología fotovoltaica en sí es una tecnología de punta, de recién desarrollo, pero los precios de adquisición se vuelven más y más bajos, mientras que la investigación sigue en mejorar la tecnología.

El Perú tiene un recurso solar muy favorable a la implementación de estos sistemas, sobre todo en el sur de la sierra y la costa; además, el recurso solar es más fácil de evaluar que los recursos hídricos y eólicos. Por tanto, en las zonas rurales sin acceso a la red, o para quienes quieren instalarse una generación de electricidad limpia, se ve como una buena alternativa a fuentes de energía tradicionales. Sin embargo, cuando hay posibilidad en el lugar de aprovechar el recurso eólico o hidráulico, el costo de la energía producida con esos se ve generalmente menos costoso. Como solución de preelectrificación para los usuarios que no quieran o no puedan instalar un sistema de potencia más grande, destaca el posible uso de sistemas picofotovoltaicos, que son sistemas muy compactos y de baja potencia, permitiendo iluminarse y suministrar pequeñas cargas como cargadores de celulares o radios.

El dimensionamiento del sistema, después de haber estimado el recurso solar local en el periodo menos favorable, se realiza mediante un balance de las cargas que se utilizarían diariamente.

Mediante el suministro de electricidad vía baterías, los usuarios tienen una iluminación de mejor calidad, pueden utilizar aparatos de pequeña potencia como radios, TVs, DVDs o cargadores de celulares. Además si el sistema tiene dimensiones suficientes para ello, pueden aprovechar esta energía para crear nuevas posibilidades de ingresos para ellos: cargas de las baterías de sus vecinos (lo más fácil de implementar), sala de televisión, pequeños talleres, juguería, peluquería, etc.

Bibliografía

1. *Principios físicos de la celda solar*. **Lamaison Urioste, Rafael Martín**. Barcelona : Dept. d'Enginyeria Electrònica-UPC.
2. **Arivilca, Roberto**. *Entrevista con R. Arivilca, gerente de Geo Energía*. Lima, 11 de enero de 2011.
3. **SolarTronic**. SolarTronic. *Preguntas frecuentes*. [En línea] http://www.solartronic.com/Ayuda/Preguntas_Frecuentes/#Preg6.
4. Universidad de Jaén. *Curso de Energía Solar*. [En línea] 2004. http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/00_presenta/0_presenta.htm.
5. **Prácticas, Soluciones**. *Visita del proyecto de Soluciones Prácticas en Alto Perú*. Cajamarca, 15 de marzo de 2011.
6. **Chow, Jack T**. *Assessment of Solar Home Systems (SHS) for Isolated Rural Communities in Vanuatu Using Project Lifecycle / Sustainability Framework*. Houghton : Michigan Technological University, 2010.
7. **SmartGauge Electronics**. SmartGauge. *Peukert's Equation*. [En línea] 2 de abril de 2008. <http://www.smartgauge.co.uk/peukert2.html>.
8. **Horn, Manfred**. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería. *¿Qué baterías usar en sistemas fotovoltaicos domiciliarios?* [En línea] 1997. <http://fc.uni.edu.pe/solar/baterias.html>.
9. —. *Entrevista con M. Horn, profesor de física en la Facultad de Ciencias de la UNI y miembro fundador del CER-UNI*. Lima, 8 de febrero de 2011.
10. **ENERGEX**. ENERGEX. *Efecto de temperatura en baterías tipo plomo-ácido*. [En línea] <http://www.energex.com.co/pdf/temperaturabaterias.pdf>.
11. **Espinoza, Rafael**. *Entrevista con R. Espinoza, director del CER-UNI*. Lima, 31 de enero de 2011.
12. **Huaraco, Jorge**. *Visita de instalaciones fotovoltaicas en el lago Titicaca, incluso el proyecto del CER-UNI*. Puno, 20-22 de marzo de 2011.
13. **Prácticas, Soluciones**. *Visita del proyecto de microaerogeneradores en El Alumbre*. Cajamarca, 16 de marzo de 2011.
14. **JAENSOLAR**. JAENSOLAR. *Características Reguladores*. [En línea] <http://www.jaensolar.com/inforegulador>.
15. **AREBOR Énergie**. AREBOR Énergie. *Encyclopédie*. [En línea] <http://www.arebor-energie.fr/encyclopedie/index.php/Accueil>.
16. **Olivares Magill, Jessica**. *Visita del proyecto Luz en Casa - Piloto fotovoltaico de Perú Microenergía*. Cajamarca, 17 de marzo de 2011.
17. **Marcelo, Oliver**. *Entrevista con O. Marcelo de ISF - Ingeniería sin Fronteras*. Lima, 10 de febrero de 2011.
18. **Green Empowerment, ITDG**. *Manual de capacitación - sistemas fotovoltaicos*. Cajamarca : s.n., junio 2005.
19. **Pearce, Joshua M., Hernandez, Victor y Seitz, Julia**. Appropedia. *Energía solar fotovoltaica*. [En línea] 2010. http://www.appropedia.org/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica.
20. **Verastegui, Angel**. *Entrevista con A. Verastegui, GIZ*. Lima, 23 de febrero de 2011.

21. **Horn, Manfred.** *Evaluación de lámparas LED para Sistemas Pico Fotovoltaicos – Informe técnico para la Cooperación Alemana al Desarrollo, agencia de la GTZ en Lima.* Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Fotometría, enero 2011.

22. **Proyecto PER/98G31 - Electrificación Rural a Base de Energía Fotovoltaica en el Perú.** *Especificaciones técnicas ETSFD-01 - Especificaciones técnicas generales para el suministro de materiales e instalación de sistemas fotovoltaicos domésticos SFD.* Lima : s.n.

23. *Universal Technical Standard for Solar Home Systems.* 1998. Thermie B SUP 995-96, EC-DGXVII.

24. **DGER/MEM.** *Reglamento técnico: Configuración de sistemas fotovoltaicos domésticos y ensayos.* Lima : DGER/MEM, junio 2004.

25. —. *Reglamento técnico: Especificaciones técnicas y procedimientos de evaluación del sistema fotovoltaico y sus componentes.* Lima : DGER/MEM, septiembre 2006.

26. **ESMAP.** *Portable Solar Photovoltaic Lanterns: Performance and Certification Specification and Type Approval.* Washington : ESMAP, 2005.

27. **CIPCSP.** CIPCSP. *L'enseillement.* [En línea] <http://www.cipcsp.com/tutorial/enseillement-france.html>.

28. McGraw-Hill. *Unidad 1 - Componentes de una instalación solar fotovoltaica.* [En línea] <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>.

29. **Ramos Heredia, Ruben, Camejo Cuán, José y Márquez Montoya, Soe.** CubaSolar. *Mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos.* [En línea] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo02.htm>.

30. **DEP/DGER/MEM.** Atlas de Energía Solar del Perú - 2003. [En línea] 2003. <http://dger.minem.gob.pe/atlassolar/#>.

Anexos

A. Reacciones químicas en una batería de plomo-ácido

Una batería almacena energía, recibida en forma eléctrica, transformándola en energía química, y la puede entregar realizando el proceso inverso. Una batería de plomo-ácido tiene un ánodo de plomo (polo negativo) y un cátodo de óxido de plomo (polo positivo); entre ellos se desarrollan reacciones de oxidación-reducción, o sea durante las cuales se realizan traslados de electrones. Los dos electrodos están en remojo en un electrolito, en general una solución de ácido sulfúrico H_2SO_4 (contiene iones móviles). Véase la Ilustración A.a.

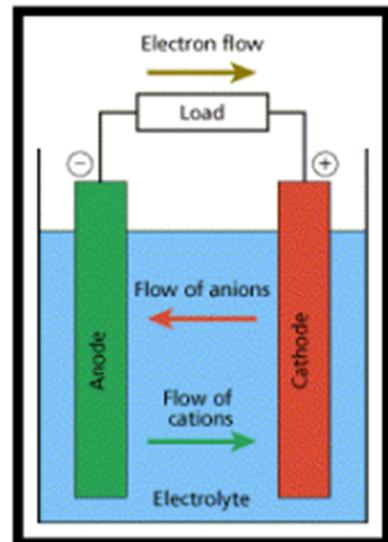


Ilustración A.a: Flujos de electrones e iones entre los electrodos (6)

En el ánodo se desarrolla la siguiente ecuación reversible:

(1)

Y en el cátodo:

(2)

Las reacciones descritas en el ánodo y cátodo son reversibles si la batería no ha estado ni completamente, ni durante mucho tiempo, descargada o sobrecargada. Un funcionamiento prolongado en uno u otro de esos estados llega a la destrucción de la batería.

Los procesos de descarga y de carga se pueden resumir así:

Descarga:

(3)

Carga:

(4)

B. Efecto Peukert (7)

Intuitivamente pensamos que el tiempo de utilización de una batería con una cierta corriente es inversamente proporcional a la intensidad de esta corriente. Tomamos el ejemplo de una batería de capacidad $C_{20} = 100$ Ah. Esto significa que la batería puede entregar una corriente de intensidad 5 A durante 20 horas.

Por intuición pensamos que la misma batería podría entregar una corriente de 10 A durante 10 horas. Lamentablemente no es el caso: podría funcionar con esta intensidad de corriente durante un tiempo un poco más corto. Este fenómeno es llamado el efecto Peukert.

Se puede calcular el tiempo durante podrá funcionar una cierta batería según la intensidad de la corriente con la ecuación de Peukert, en la cual interviene el coeficiente de Peukert. Valores típicos para el coeficiente de Peukert son 1.2 o 1.3.

$$T = \frac{C}{\left[\frac{I}{(C/R)}\right]^n} \cdot \frac{R}{C} \quad (5)$$

Donde:	T	es el tiempo	[h]
	I	es la corriente de descarga	[A]
	C	es la capacidad de la batería	[Ah]
	R	es la evaluación en horas de la batería (20 horas correspondiendo a C20, 100 horas a C100, etc.)	[h]
	n	es el coeficiente de Peukert	[-]

A veces es más simple utilizar esta ecuación así, pero naturalmente se puede escribir de forma más sintética:

$$T = R \cdot \left[\frac{(C/R)}{I}\right]^n \quad (6)$$

Con la batería del ejemplo sometida a una corriente de 10 A, si suponemos que el coeficiente de Peukert vale 1.3, tenemos:

$$T = 20 \cdot \left[\frac{(100/20)}{10}\right]^{1.3} = 20 \cdot 0.5^{1.3} = 8.12 \text{ h} \quad (7)$$

Entonces esta batería entrega una corriente de 5 A durante 20 horas pero una corriente de 10 A sólo durante 8.12 horas, y no 10.

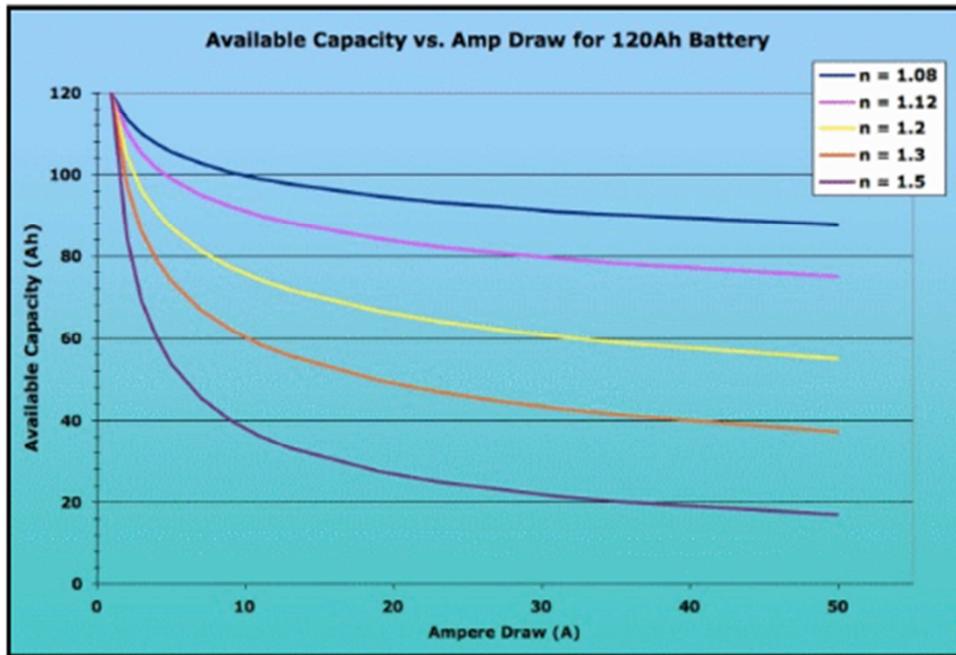


Ilustración B.a: Influencia del coeficiente de Peukert y de la corriente sobre la capacidad de la batería (6)

C. Mapa de energía solar del Perú



Ilustración C.a: Energía solar incidente diaria en promedio anual (1975-1990) en el Perú (30)

D. Principios básicos de electricidad

D.1. Cargas eléctricas

La electricidad es una energía provocada por el movimiento de cargas eléctricas. No resulta visible, pero es claramente existente por los efectos que produce.

La partícula elemental de la electricidad es el electrón, la mínima expresión de carga eléctrica, que es negativa. La carga eléctrica llevada por un electrón vale el opuesto de la carga eléctrica elemental, o sea $-1.6 \cdot 10^{-19}$ C (C: coulomb / colombio). Los electrones son partículas subatómicas, junto con los protones y neutrones, que forman el núcleo del átomo, mientras que los electrones se encuentran en torno a este núcleo.

D.2. Corriente eléctrica

D.2.1. Definiciones

La corriente eléctrica es la circulación ordenada de electrones a través de un conductor.

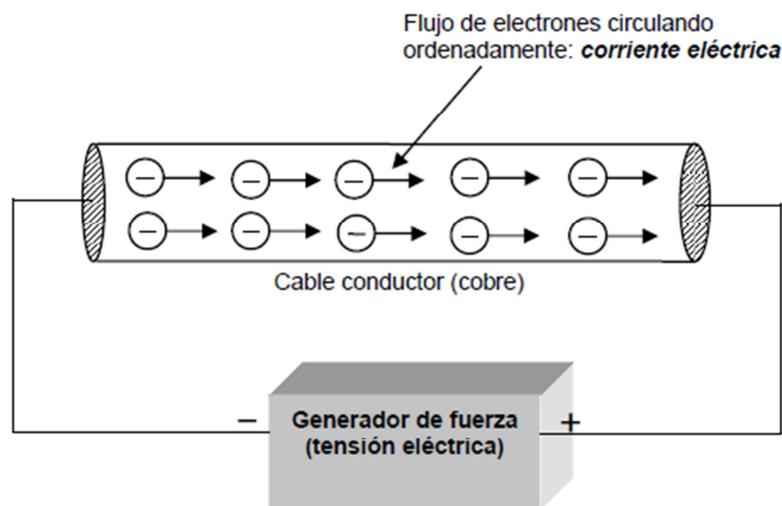


Ilustración D.a: Corriente eléctrica, generada por el movimiento de electrones¹⁹

La intensidad de la corriente es la cantidad de carga eléctrica que circula por un conductor en la unidad de tiempo. Se mide en amperios (A). De manera convencional, la corriente eléctrica circula en el sentido opuesto al movimiento real de los electrones; se debe a lo que cuando se definió la corriente eléctrica, se pensaba que era debida a un movimiento de cargas positivas.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (8)$$

Donde: I es la intensidad de la corriente eléctrica [A]
 Q es la cantidad de carga eléctrica circulando en el tiempo [C]

¹⁹ <http://www.marcombo.com/Descargas/HERMOSA,%20ANTONIO/Electrotecnia-capitul%201.pdf>

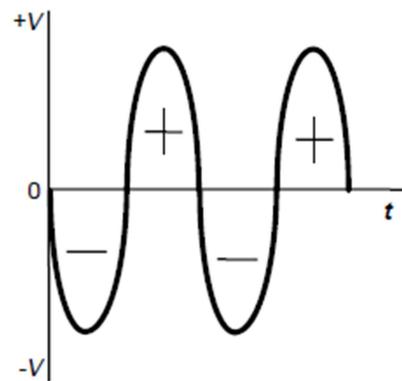
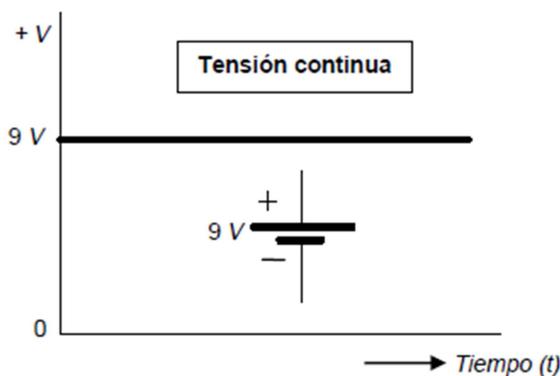
es el tiempo

[s]

La tensión eléctrica en los bornes de un dipolo es la circulación del campo eléctrico en este dipolo. Entonces representa el trabajo de la fuerza eléctrica en el dipolo, originada por el campo eléctrico, sobre una carga eléctrica que lo atraviesa, dividido por el valor de la carga: es una energía por unidad de carga, expresada en voltios (V). Este trabajo permite poner en movimiento las cargas eléctricas y provocar la corriente eléctrica. En régimen estacionario, la tensión está asimilada a una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

La corriente eléctrica puede ser continua (CC) o alterna (CA) según el tipo de generador utilizado. Las corrientes continuas se caracterizan por una polaridad de la tensión y un sentido de la corriente constantes a lo largo del tiempo; al contrario, la polaridad de una tensión alterna y el sentido de una corriente alterna van cambiando periódicamente.

Por ejemplo, en el caso de la red eléctrica, la polaridad de la tensión cambia 50 a 60 veces por segundo (dependiendo si la frecuencia característica de la red es 50 o 60 Hz); y el valor eficaz de la tensión es de 220 o 230 V.



La resistencia eléctrica es la menor o mayor oposición de un cuerpo al paso de la corriente eléctrica. Los materiales que presentan una gran oposición al paso de la electricidad son llamados aislantes y en consecuencia tienen una resistencia eléctrica elevada. Al contrario, los cuerpos que apenas se oponen al paso de la corriente eléctrica son llamados conductores y tienen una resistencia eléctrica muy baja. La resistencia eléctrica se mide en ohmios (Ω).

El valor de la resistencia depende de la longitud, la sección y la resistividad del conductor; la resistividad es característica de un material.

$$- \quad (9)$$

Donde:	es la resistencia del conductor eléctrico	[Ω]
	es la resistividad del material constituyendo el conductor	[$\Omega \cdot m$]
	es la longitud del conductor eléctrico	[m]
	es la sección del conductor eléctrico	[m ²]

²⁰ <http://www.marcombo.com/Descargas/HERMOSA,%20ANTONIO/Electrotecnia-capitul%201.pdf>

²¹ *ibid.*

Por tanto, a mayor longitud de un conductor eléctrico, mayor resistencia, y a mayor sección, menor resistencia.

D.2.2. Analogía hidráulica

Para poder representarse la corriente eléctrica, que es invisible, se suele compararla con un flujo de agua. La corriente eléctrica equivale a la corriente de fluido que circula por una tubería, que es la imagen de la circulación de cargas eléctricas por un conductor eléctrico.

En este símil hidráulico, la intensidad es comparable al caudal, o sea a la cantidad de agua que pasa por la tubería en la unidad de tiempo.

La fuerza que presiona para que los electrones se muevan es la tensión eléctrica. Considerando una cantidad de agua entre dos puntos de niveles diferentes (caída de agua), el agua en el punto más alto tiene una energía potencial gravitatoria. Esta energía es la que permite la puesta en movimiento del agua, convirtiéndose en energía cinética. Similarmente, la tensión, que es una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, permite la puesta en movimiento de los electrones. En lugar de la diferencia de energía potencial debida al desnivel, también se puede comparar con el trabajo realizado por una bomba.

D.3. Circuitos eléctricos

Un circuito eléctrico es una red eléctrica que contiene al menos una trayectoria cerrada.

D.3.1. Circuito en serie

En un circuito en serie, los bornes de los diferentes dispositivos se conectan secuencialmente: el borne de salida de un dispositivo se conecta al borne de entrada del dispositivo siguiente.

Si el circuito en serie conecta n dispositivos, la intensidad de corriente circulando en el circuito es la misma en cada punto, mientras que las tensiones se adicionan.

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (10)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (11)$$

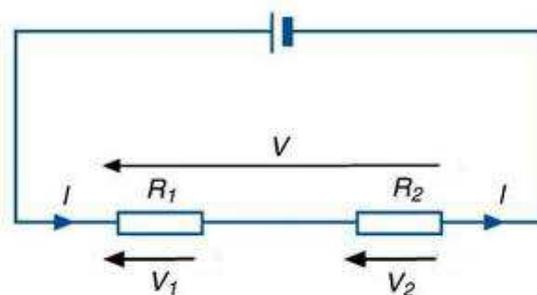


Ilustración D.d: Circuito en serie²²

²² http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/series_circuit.html

D.3.2. Circuito en paralelo

En un circuito en paralelo, los bornes de entrada de los diferentes dispositivos eléctricos coincidan en un mismo punto. Lo mismo vale para los bornes de salida.

Si el circuito en serie conecta n dispositivos, la tensión en los bornes de cada dispositivo es la misma, mientras que las intensidades de corriente se adicionan.

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (12)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (13)$$

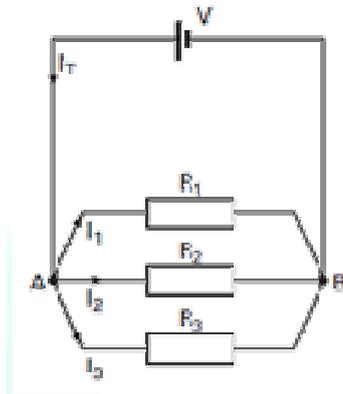


Ilustración D.e: Circuito en paralelo²³

En una vivienda conectada a la red, los aparatos eléctricos son conectados en paralelo, para que puedan funcionar de manera independiente. Si fueran conectados en serie, la desconexión de sólo un aparato impediría los otros de funcionar, ya que eso abriría el circuito.

D.3.3. Ley de Ohm

La ley de Ohm permite vincular tensión, intensidad y resistencia en un circuito eléctrico. Afirma que la corriente que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante.

$$I = \frac{V}{R} \text{ o } V = RI \quad (14)$$

Donde:	I	es la intensidad de la corriente eléctrica	[A]
	V	es la tensión en los bornes del conductor eléctrico	[V]
	R	es la resistencia del conductor eléctrico	[Ω]

D.4. Potencia y energía eléctricas

²³ <http://www.portalelectricos.com/cursos/fundamentoselectricidad5.php>

La potencia eléctrica es la energía eléctrica consumida o liberada en la unidad de tiempo. Se expresa en vatios (W).

$$P = \frac{E}{t} \quad (15)$$

Donde: P es la potencia [W]
 E es la energía consumida o liberada [J], o [Wh]
 t es el tiempo en el cual la energía es consumida o liberada [s], o [h]

El elemento que libera energía es un generador y el que consume energía es un receptor. Del punto de vista receptor, se puede decir que la potencia eléctrica es la capacidad que tiene éste para transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía; cuanto más rápido sea capaz de realizar esta transformación, mayor será la potencia del mismo. Viceversa, del punto de vista generador, se puede decir que la potencia eléctrica es la capacidad que tiene éste para transformar otro tipo de energía en energía eléctrica.

Aunque la unidad del tiempo y la de la energía sean en el sistema internacional de unidades (S.I.) respectivamente el segundo (s) y el julio o joule (J), se suele en el ámbito de instalaciones eléctricas en viviendas y otros expresar el tiempo en horas (h) y por tanto la energía en vatios-horas (Wh).

$$1 Wh = 3600 J \quad (16)$$

En corriente continua, la potencia de un dispositivo es el producto de la tensión en sus bornes por la intensidad de la corriente que lo atraviesa.

$$P = V \cdot I \quad (17)$$

Donde: P es la potencia [W]
 V es la tensión en los bornes del dispositivo [V]
 I es la intensidad de la corriente en el dispositivo [A]

Por tanto, utilizando la ley de Ohm, se puede calcular la potencia perdida en forma de calor en una resistencia eléctrica, eso siendo llamado el efecto Joule:

$$P = V \cdot I = RI^2 \quad (18)$$

En corriente alterna sinusoidal monofásica, la potencia es el producto de los valores eficaces de la tensión y de la intensidad con el coseno de la desfase entre la tensión y la intensidad.

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \quad (19)$$

Donde: P es la potencia [W]
 V_{ef} es la tensión eficaz en los bornes del dispositivo [V]
 I_{ef} es la intensidad eficaz de la corriente en el dispositivo [A]

Puesto que un valor eficaz se define en régimen sinusoidal como el valor máximo dividido por la raíz cuadrada de 2,

$$P = \frac{1}{2} V_{max} \cdot I_{max} \cdot \cos \varphi \quad (20)$$

Donde: V_{max} es la tensión máxima en los bornes del dispositivo [V]
 I_{max} es la intensidad máxima de la corriente en el dispositivo [A]
 φ es la desfase de la intensidad relativamente a la tensión [rad] o [°]