




CURSO DE ENERGIA SOLAR


C.T.E. CENTRO DE TECNOLOGIA
EDUCATIVA

**CURSO
DE
ENERGIA
SOLAR**

TOMO 7




ENERGIA SOLAR



El presente Curso de Energía Solar, especialmente pensado para la enseñanza a distancia, ha sido desarrollado por el siguiente equipo de profesionales:

- **Textos:** Jaume Ribot i Martín, *Ingeniero Industrial, ex profesor de la Universidad Politécnica de Barcelona, miembro de ISES (International Solar Energy Society).*
- **Dibujos:** Antonio Escuder Torres.
- **Ilustraciones humorísticas:** Jordi Sempere.
- **Fotografías:** Jaume Ribot y archivo de CTE.
- **Maquetación y montaje:** Roser Quinquillà Pedro.
- **Supervisión didáctica:** José L. Barón Sesé.



© CTE-Centro de Tecnología Educativa, S.A.
Vía Augusta, 4, 6ª planta,
08006 Barcelona.

Segunda edición, marzo 1995.
ISBN Obra completa: 84-7608-054-9.
ISBN Tomo 7: 84-7608-091-1.
D.L.: B-8925-1995.

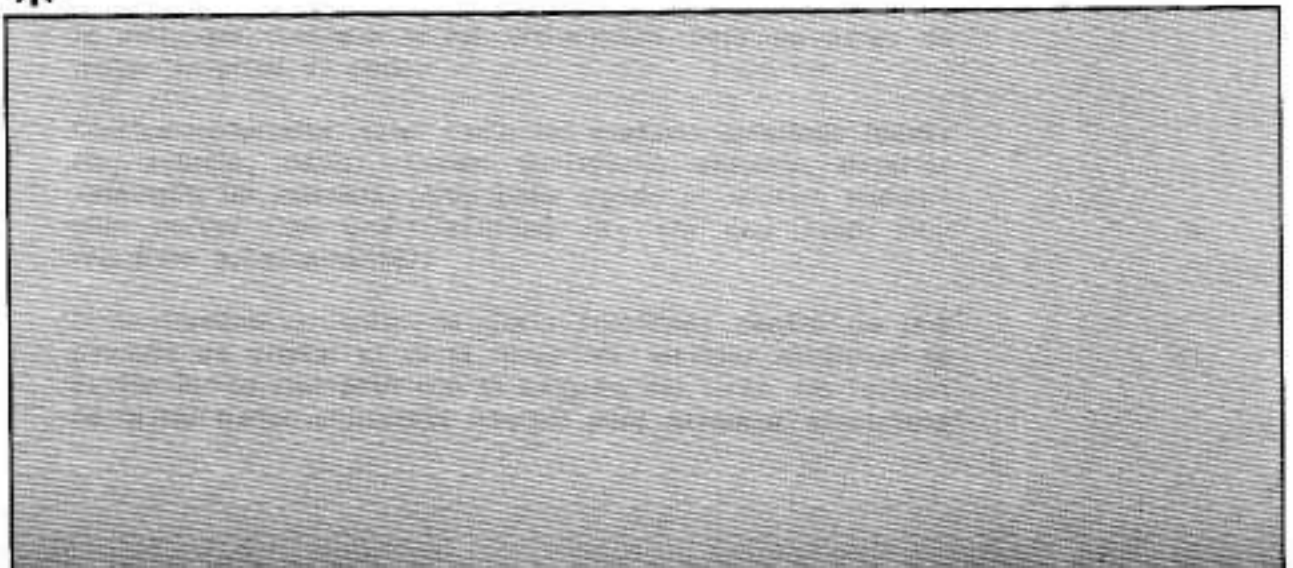
Impreso en Imprimeix, S. Coop. Ltda.
C/ Eduardo Maristany, 100. Badalona (Barcelona) ESPAÑA.

Reservados los derechos para todos los países.
Se prohíbe la reproducción total o parcial.

SUMARIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Lección 28. El efecto fotoeléctrico. Naturaleza de la luz. Semiconductores. Unión N-P. Fotopilas. Curva característica de una fotopila. Datos de interés. | 5 |
| Lección 29. Paneles solares fotovoltaicos. Fabricación de fotopilas. Encapsulado del panel. Diodo de bloqueo. Sistemas fotovoltaicos de concentración. Fotopilas bifaciales. Datos de interés. | 29 |
| Lección 30. Instalaciones solares fotovoltaicas. Componentes de una instalación solar fotovoltaica. Inclinação y orientación de los paneles. Regulador de carga. Baterías. Instalación en serie y en paralelo. Convertidos continuos-alterna. Sistemas de protección. | 45 |
| Lección 31. Cálculo de una instalación fotovoltaica. Características de salida de un panel fotovoltaico. Valor de la radiación incidente. Cálculo de la superficie de paneles solares fotovoltaicos necesaria. Cálculo de la capacidad de la batería. Ejemplo de aplicación. Datos de interés. | 65 |
| Lección 32. La energía del viento. Circulación de vientos en la tierra. Propiedades de la energía eólica. Tipos de aerogeneradores. Rendimiento de un aerogenerador. Aplicaciones de la energía eólica. | 81 |

LECCION 28





28. EL EFECTO FOTOELECTRICO

INTRODUCCION

La producción directa de electricidad es una de las aplicaciones más interesantes de la energía solar. Esta producción se consigue mediante *fotopilas*, que son unos elementos que transforman la luz natural o artificial en electricidad de forma directa.

NATURALEZA DE LA LUZ

De acuerdo con las teorías actualmente aceptadas, la luz puede considerarse como un flujo de partículas llamadas **fotones**, las cuales se comportan como si fueran ondas. Por esta razón, la luz recibe el nombre de **radiación electromagnética**, al ser una radiación corpuscular (los fotones tienen masa nula) y tener propiedades ondulatorias (reflexión, refracción, absorción, etc.).

Estos fotones se caracterizan por poseer cada uno de ellos una cierta energía. Cuanto menor es la longitud de onda, tanto mayor es la energía del fotón.

Así, una luz ultravioleta es más energética que una luz roja de la misma intensidad de fotones, y ello se pone de manifiesto en aspectos tales como el poder bactericida, incitación a la fluorescencia, y hasta en el bronceado de la piel, que consigue la luz ultravioleta pero no otras de mayor longitud de onda.

Ciertos materiales, tales como los metales alcalinos (potasio, rubidio, cesio), tienen su último electrón exterior -**electrón de valencia**- muy poco ligado al núcleo, pudiéndolo perder con gran facilidad (de ahí que sean muy reactivos químicamente).

Si se ilumina un trozo de cesio (colocado dentro de una ampolla de cristal al vacío, pues los metales alcalinos se oxidan inmediatamente con el oxígeno del aire), los fotones de la luz tienen suficiente energía para **arrancar** electrones

del metal (Fig.1). Variando el tipo de luz, puede constatar-se que este fenómeno depende de dos factores:

- La longitud de onda de la luz incidente.
- El flujo luminoso.

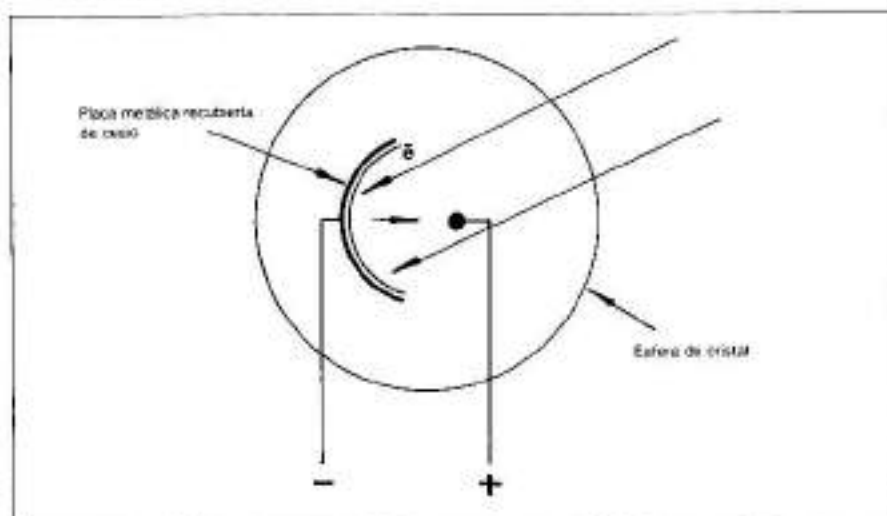


Fig. 1.—La luz puede arrancar electrones de ciertos metales alcalinos, produciendo una corriente eléctrica.

Cuanto menor sea la longitud de onda, los fotones son más energéticos y, por lo tanto, arrancan con más facilidad los electrones del metal.

Por otra parte, cuanto mayor sea el flujo luminoso (número de fotones por segundo y por unidad de superficie), más fotones inciden sobre el metal y, por consiguiente, pueden arrancar más electrones del mismo.

Un dispositivo de esta clase constituiría una **fotopila**, es decir, un **generador de corriente eléctrica** continua que funciona al ser iluminado.

Una fotopila como la descrita no se utiliza debido a su poco rendimiento y a su fragilidad, puesto que se han obtenido otros elementos de mejores características basados en semiconductores.

SEMICONDUCTORES

Los elementos químicos reaccionan entre sí mediante una cesión y captura de electrones. Así, en un cristal de cloruro de potasio (K Cl), el cloro captura un electrón cedido por el átomo de potasio, mientras que en una

molécula de agua, el oxígeno captura dos electrones cedidos cada uno de ellos por un átomo de hidrógeno.

Según su colocación en la tabla periódica, los distintos elementos químicos tienen tendencia a ceder o a capturar electrones hasta formar una configuración más estable en sus capas orbitales. Los elementos situados a la izquierda de la tabla periódica*, tienen tendencia a **perder** electrones, mientras que los situados a la derecha la tienen a **ganarlos**. Los gases nobles tienen su estructura completa, por lo que no presentan tendencia a ganar o perder electrones y, por ello, no reaccionan químicamente (Fig.2).

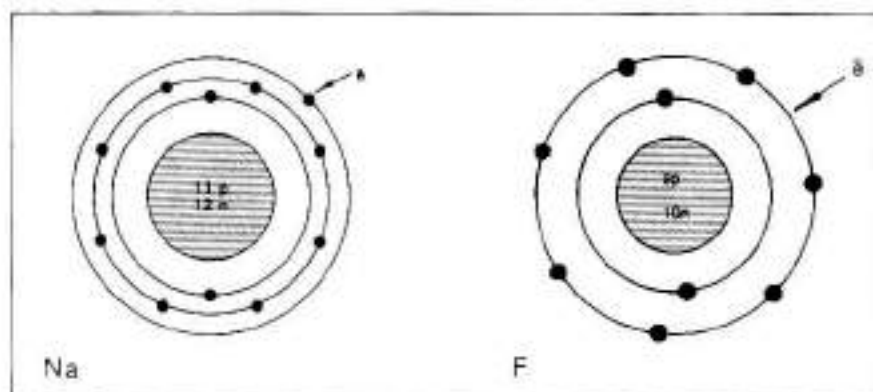


Fig. 2. - Modelo de los átomos de sodio y flúor. El sodio puede perder fácilmente su último electrón, mientras que el flúor puede ganar uno, para tener en ambos casos la última capa con ocho electrones.

Los elementos situados en la zona central de la tabla periódica pueden ganar o perder electrones con igual facilidad y según les convenga. Entre estos elementos están el **silicio** y el **germanio**, que tienen la propiedad de ofrecer una **cierta resistencia** al paso de la corriente eléctrica bastante superior a la que presentan los metales, pero inferior a la que presentan otros compuestos no metálicos como el azufre.

Supongamos un cristal de silicio. El silicio es un elemento sumamente abundante en la Tierra. El silicio puro es un material negro azulado con cierto brillo metálico apagado que puede acrecentarse mediante un pulido de su superficie. Químicamente, es bastante inerte y no reacciona a temperatura ambiente con el oxígeno del aire. Su compuesto más usual es el óxido de silicio (Si O_2), conocido como **cuarzo**, que es el componente principal de muchas rocas y arenas.

En un cristal de silicio puro, los átomos de silicio están unidos a los demás enlaces **covalentes**. Cada átomo se une a cuatro átomos más mediante cuatro enlaces covalentes.

* Ver esta tabla al final del tema.

Cada enlace covalente contiene **dos electrones** que comparten los dos átomos vecinos. La estructura del cristal de silicio es tridimensional, y cada átomo ocupa el centro de un tetraedro, lo que origina un sólido de gran dureza, elevado punto de fusión y escasa conductividad eléctrica (Fig.3).

Si a este cristal de silicio puro se le añaden **pequeñas cantidades** de impurezas, (por ejemplo, elementos químicos como boro o fósforo), la conductividad eléctrica del mismo aumenta enormemente debido al hecho de que estos átomos de impurezas sustituyen a átomos de silicio.

Sea, por ejemplo, un átomo de fósforo. Este átomo de fósforo puede perder cinco electrones mientras que el silicio pierde solamente cuatro. Al estar rodeado de átomos de silicio, el átomo de fósforo deberá compartir sus electrones con los cuatro átomos de silicio vecinos, a razón de un electrón por átomo (el otro electrón del enlace covalente lo proporciona el otro átomo de silicio vecino). De esta forma, se tienen cuatro enlaces covalentes con dos electrones cada uno, un átomo de fósforo con carga positiva y un **electrón libre** (Fig.4).

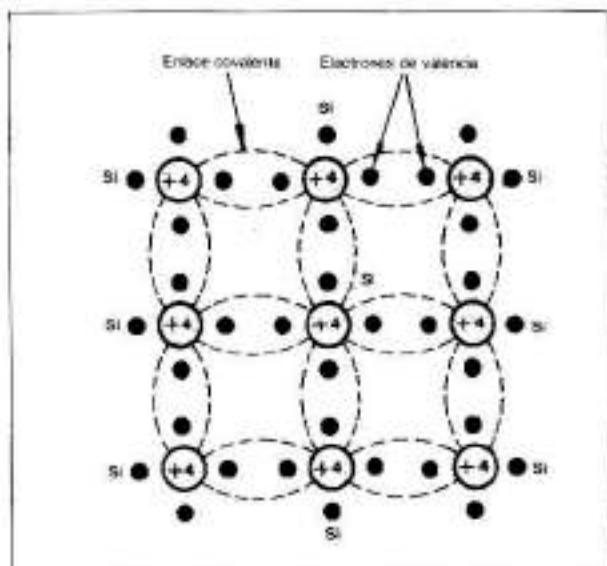


Fig. 3.- Estructura del silicio

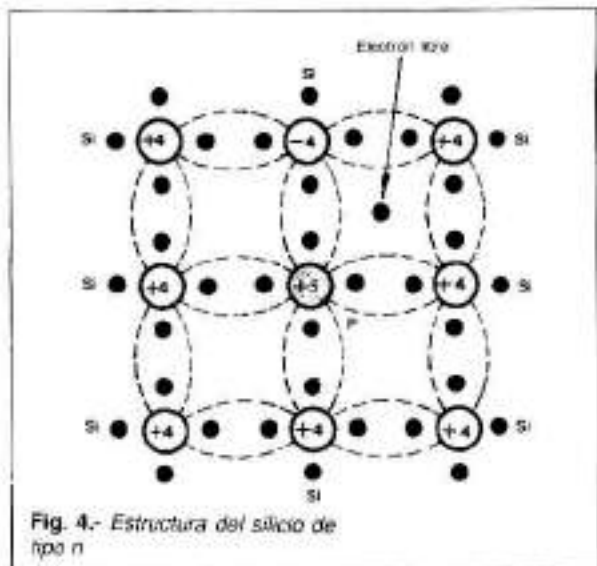


Fig. 4.- Estructura del silicio de tipo n

La presencia de estos electrones libres hace que la conductividad eléctrica de este silicio impurificado (dopado con fósforo) **aumente enormemente** respecto al silicio puro.

Si en lugar de fósforo ponemos un átomo de boro que pueda perder tres electrones, el resultado será que el

átomo de boro sustituirá a un átomo de silicio en la red cristalina, compartiendo sus tres electrones con los cuatro átomos de silicio vecinos.

Como consecuencia de ello, uno de los cuatro enlaces covalentes sólo tendrá **un electrón** en lugar de los dos habituales, un átomo de boro con carga negativa y un **hueco** que tiene el mismo efecto que una carga positiva en el lugar donde falta el electrón (Fig.5).

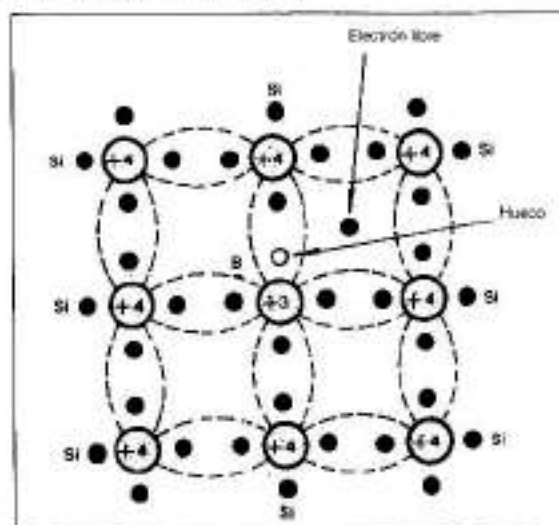


Fig. 5.- Estructura del silicio tipo p

Estos huecos se comportan de un modo parecido a los electrones, aumentando también, en este caso, considerablemente la conductividad eléctrica del cristal de silicio dopado con boro respecto al silicio puro.

A un cristal semiconductor dopado con elementos del grupo 5 de la tabla periódica (que pueden perder 5 electrones) tales como fósforo, arsénico, antimonio, etc. se le llama de **tipo n** (n de negativo).

Por el contrario, al cristal semiconductor dopado con elementos del grupo 3 (que pueden perder 3 electrones) tales como el boro, aluminio, galio, etc. se le llama de **tipo p** (p de positivo).

Hay que recalcar que los cristales dopados del tipo n ó p son **eléctricamente neutros**, ya que existe en ellos igual cantidad de cargas positivas y negativas. Las diferencias estriban en la presencia de cargas móviles (electrones = material de tipo n) o huecos (material de tipo p). Estas cargas móviles son las que realizan la **conducción de la corriente**. En los metales (buenos conductores) existe

gran cantidad de electrones libres junto con los átomos con carga eléctrica positiva, y no por ello los metales dejan de ser eléctricamente neutros.

UNION N-P

Si un cristal semiconductor, por ejemplo silicio, del tipo n se junta con otro del tipo p, se obtiene la unión n-p que presenta interesantes propiedades respecto al paso de la corriente eléctrica a su través (Fig.6).

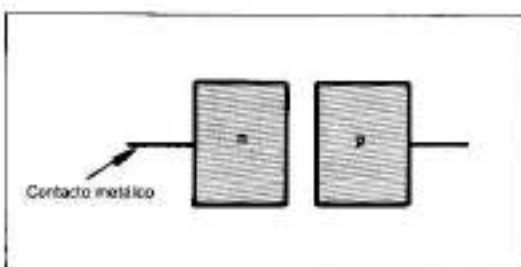


Fig. 6.—Unión n-p. Se obtiene uniendo un material de tipo n y otro de tipo p, junto con unos contactos metálicos.

En efecto: en las proximidades de la unión de los dos materiales, los electrones libres existentes en el material de tipo n tenderán a pasar a rellenar los huecos del material de tipo p. Ahora bien, si lo hacen, el material de tipo n **perderá electrones** y, dado que era eléctricamente neutro, esta pérdida de electrones supondrá que **adquirirá carga eléctrica positiva**.

Por el contrario, el material de tipo p **adquirirá electrones** y dejará de ser eléctricamente neutro, adquiriendo **carga eléctrica negativa**.

La adquisición de carga positiva en el material de tipo n y de carga negativa en el material de tipo p **impedirá** que los electrones atraviesen la unión para recombinarse con los huecos del material de tipo p.

Si un electrón atraviesa la unión n-p, se encontrará simultáneamente **repelido** por el material de tipo p y **atraído** por el material de tipo n, en virtud de la ley de atracción electrostática. El resultado es como si en la unión hubiera una **barrera** que impidiera a los electrones pasar del material de tipo n al de tipo p. Esta barrera se conoce como **barrera de potencial** (Fig.7) y los electrones sólo pueden pasar en el sentido **n al p** si tienen una energía superior a esta barrera. La circulación de electrones en el sentido **p al n** está **prohibida** por el hecho de que en

el material del tipo p no hay electrones libres que transporten la corriente eléctrica.

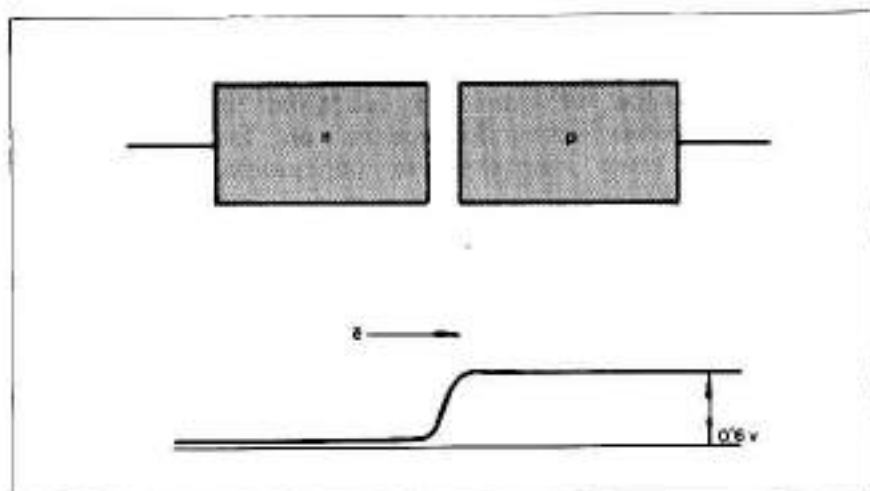


Fig. 7.- Barrera de potencial en la unión n-p, con tensión eléctrica aplicada en ella. La tensión mínima para poder atravesarla es de 0.6 v en el caso del silicio.

Si a dos cristales semiconductores del tipo n y p, respectivamente, se les une y se les dota de unos contactos metálicos por donde podamos hacer circular una corriente eléctrica, tenemos construido un **diodo**, que permite el paso de la corriente eléctrica en un sentido pero no en el otro (Fig.8).

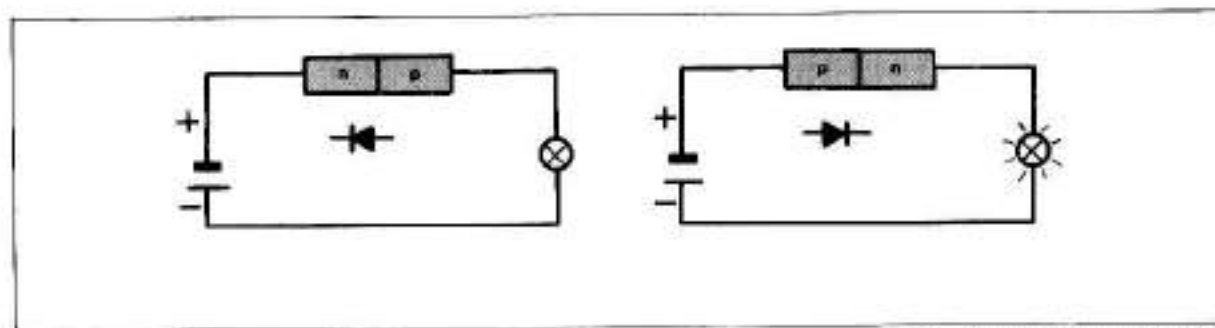


Fig. 8.- Polarización inversa y directa del diodo. La unión n-p deja pasar la corriente eléctrica en un sentido, pero no en el otro.

Si conectamos este diodo con una fuente de corriente continua de forma que el polo negativo coincida con el material de tipo n y el polo positivo con el material de tipo p, tendremos polarizado el diodo de forma **directa** y circulará la corriente por él.

En efecto: los electrones recorren el circuito saliendo del polo negativo de la fuente de corriente continua (al revés que el sentido de la corriente). Los electrones atraviesan el contacto metálico del lado n y se introducen en el semiconductor de tipo n "empujando" a los electrones libres que hay en el cristal del tipo n.

Si la tensión eléctrica que proporciona la fuente de corriente continua es superior a la de la barrera de potencial de la unión n-p (aproximadamente 0,2 voltios para el germanio y 0,6 V, para el silicio), los electrones del lado n atraviesan la unión n-p recombinándose con los huecos, lo que exige que el contacto metálico de la unión p absorba electrones (creando huecos en las proximidades del contacto) para mantener la continuidad del circuito eléctrico (Fig.9).

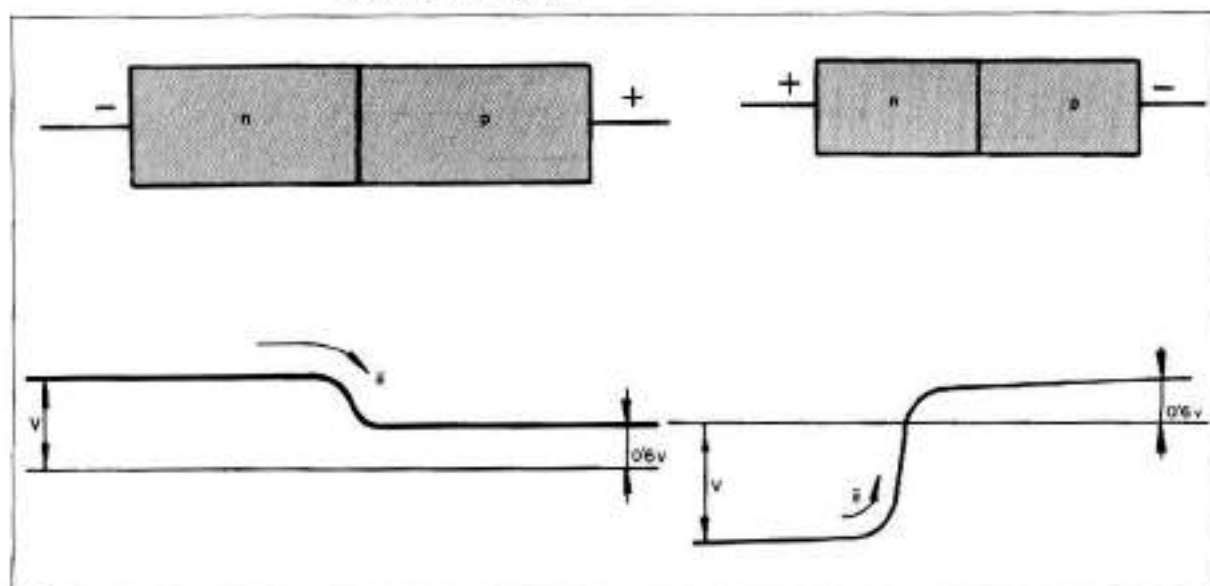


Fig. 9.- A la izquierda unión n-p polarizada en sentido directo. Los electrones «caen» por la barrera potencial (V = tensión aplicada). A la derecha polarización inversa, en ella los electrones no pueden superar la barrera de potencial (V = tensión inversa aplicada).

Para que la circulación de corriente eléctrica sea posible, el potencial externo (tensión de la fuente de alimentación de corriente continua) debe ser **superior** a la **barrera de potencial**, ya que, en caso contrario, los electrones no podrán atravesar la unión n-p debido a que la barrera de potencial es mayor que la tensión exterior aplicada a los extremos metálicos de los dos cristales dopados de tipo n y p.

Si invertimos la polaridad de la fuente de alimentación, conectando el polo positivo al material de tipo n y el negativo al material de tipo p, la barrera de potencial de la unión n-p se **incrementa** en el mismo valor que la tensión aplicada, impidiendo aún más el posible paso de electrones a través de la unión n-p, por lo que no puede circular ninguna corriente (**polarización inversa**).

En efecto: El material de tipo n se carga positivamente debido a que está conectado al polo positivo de la fuente de alimentación, mientras que el material de tipo p se

carga negativamente por el hecho de estar conectado al polo negativo. Debido a ello, ningún electrón atravesará la unión n-p ya que, de hacerlo, sería inmediatamente repelido hacia el material n, puesto que el material n está cargado positivamente (lo atraería), y el material p está cargado negativamente (lo repelería) (Fig.10).

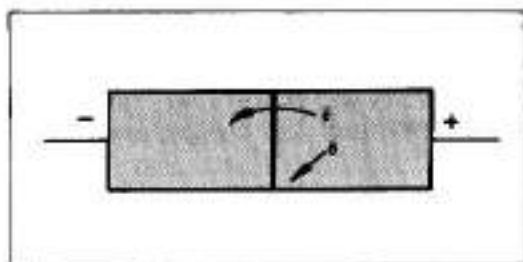


Fig. 10.—Los electrones pueden pasar del material n al material p, pero no al revés.

En la proximidades de la unión n-p pueden producirse espontáneamente **pares electrón-hueco**, los cuales se pueden separar debido a la presencia de la barrera de potencial. La creación de un par electrón-hueco no vulnera el principio de conservación de la carga eléctrica, puesto que la carga eléctrica del electrón (tomado de un enlace covalente) se anula con la falta de carga que origina la ausencia del electrón (hueco). Del mismo modo, los pares existentes electrón-hueco pueden **recombinarse** y anularse entre sí, si se encuentran.

La creación de pares electrón-hueco aumenta al aumentar la energía aplicada al semiconductor, como sucede al aumentar su temperatura, hacer incidir radiaciones electromagnéticas, etc. (Fig.11). En particular, si un haz de luz incide sobre un material semiconductor, puede producir pares electrón-hueco si la energía de sus fotones es superior a un cierto valor. Este valor mínimo depende del semiconductor empleado. Para el caso del silicio, esta energía mínima corresponde a la luz de longitud de onda de $1.1 \mu\text{m}$, que es el valor del infrarrojo próximo.

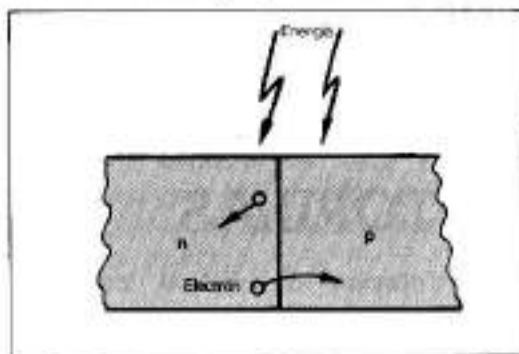


Fig. 11.—En las proximidades de la unión n-p se pueden crear pares electrones-hueco. En estas condiciones, los electrones se dirigen hacia el material de tipo p y los huecos hacia el material de tipo n.

Elo quiere decir que utilizando silicio no podemos aprovechar toda la energía del espectro solar, sino sólo aquella cuya longitud de onda sea inferior a $1.1 \mu\text{m}$.

Como puede observarse, este hecho supone una limitación, puesto que para aplicaciones térmicas podríamos disponer de toda la energía del espectro solar (visible+infrarrojo), mientras que aquí, para una fopopila, parte del infrarrojo no será útil (Fig.12).

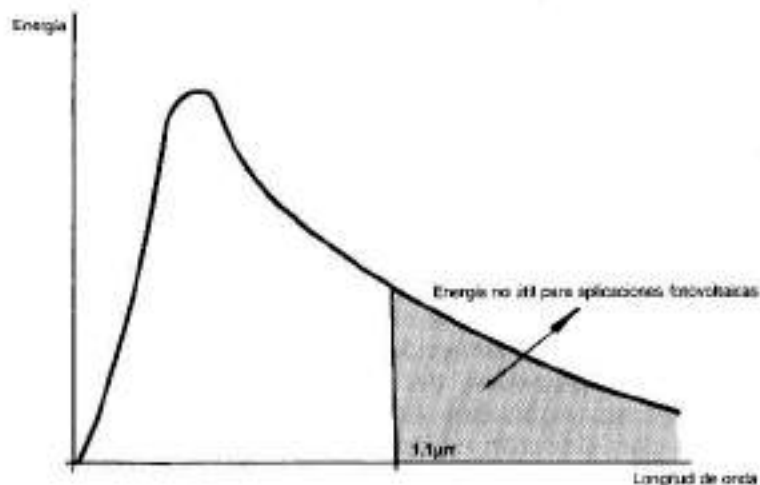


Fig. 12.—No todo el espectro solar es útil para obtener energía eléctrica en una fopopila de silicio.

Además, al incidir energía solar, la fopopila transformará parte de esta energía solar en energía eléctrica, mientras que otra parte de la energía, y particularmente la zona de infrarrojo que no sirve para producir pares electrón-hueco debido a su baja energía, se destinará a **calentar** la fopopila.

El calentamiento de la fopopila hace aumentar la tasa de recombinación de pares electrón-hueco entre sí. Este proceso de recombinación, debido al aumento de temperatura, se realiza a mayor velocidad que su propia creación debido a la elevación de temperatura, con lo que el resultado final es que al **incrementar la temperatura** de la fopopila aumenta la **recombinación** global de pares electrón-hueco y con ello disminuye su rendimiento.

FOTOPILAS

Una fopopila de silicio consta de un **disco** de silicio, compuesto a su vez por dos discos de igual diámetro pero de distinto espesor, unidos uno encima del otro. Uno de

estos discos es de tipo n y el otro p.

El disco inferior es **más grueso** y se apoya en la base en un **contacto metálico**, que es el que sirve para la recogida de la corriente.

El disco superior es **muy delgado** y tiene en su parte superior unas **tiras metálicas también muy delgadas** en forma de rejilla, destinadas a recoger la corriente eléctrica. (Este contacto tiene forma de rejilla muy estrecha para poder dejar pasar al máximo la luz del Sol) (Fig.13).

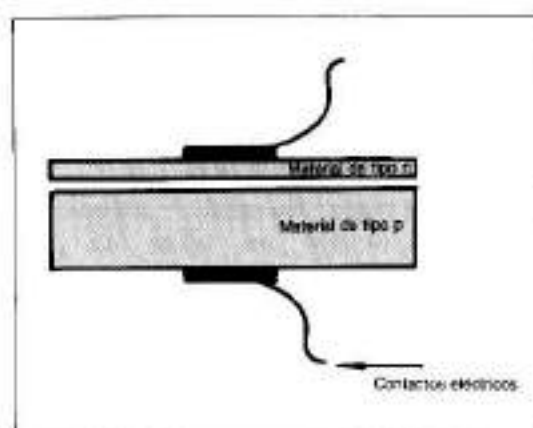


Fig. 13.-Corte de una fotocélula.

El tipo de material n ó p de los discos es indiferente, pudiendo ser el superior de tipo n y el inferior de tipo p, ó al revés. Ello sólo afectará al sentido de la corriente eléctrica, puesto que la proporción de impurezas (dopado) es tan pequeña que no modifica sus propiedades mecánicas (un material de tipo n o de tipo p son indistinguibles a simple vista).

La razón de que el disco superior sea muy delgado, estriba en el hecho de que el silicio es **opaco** a la luz. No obstante en **espesores muy pequeños es translúcido**.

El funcionamiento de una fotocélula es el siguiente:

La luz del Sol incide sobre el disco superior (que supondremos que es de tipo n) y penetra algunas milésimas de milímetro dentro del silicio. El espesor de esta capa se realiza de forma que aproximadamente el 50% de la luz sea absorbida en el disco superior y el 50% restante en un espesor equivalente del disco inferior.

La luz, como hemos dicho, es absorbida por el silicio. Los fotones que poseen una energía superior al valor

umbral **pueden** producir pares electrón-hueco, pero no todos los producen puesto que la gran mayoría sólo se emplean en generar calor en la propia fotopila.

Debido a la irradiación de la fotopila, aparecen numerosos pares electrón-hueco en las proximidades de la unión n-p. Por causa de la barrera de potencial, los electrones son atraídos por el material p situado en la parte inferior al tiempo que los huecos lo son por el material n de la parte superior. En estas condiciones, el material p tiene un exceso de electrones (se carga negativamente), mientras que el material n tiene un déficit de electrones (se carga positivamente), apareciendo una **diferencia de potencial** de aproximadamente 0.5 voltios entre el contacto superior de rejilla y el disco metálico inferior (la tensión depende de la temperatura y puede variar un poco alrededor de los 0.5 voltios) (Fig.14).

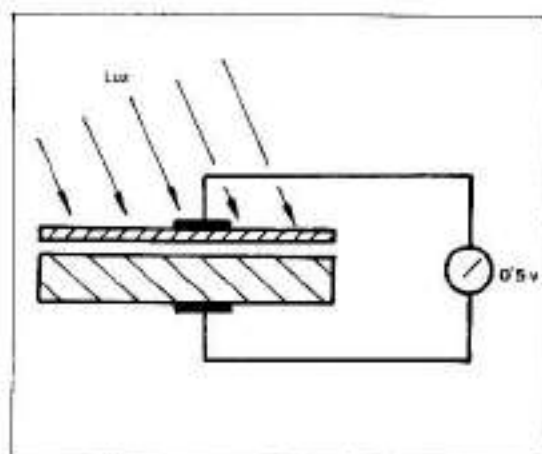


Fig. 14.—Al ser iluminada una fotopila aparece en ella una diferencia de potencial de alrededor de unos 0.5V.

La fotopila ya está en condiciones de funcionamiento. Sin embargo, lo usual es **encapsularla** en un **recipiente hermético** que la proteja del polvo, lluvia, posibles golpes, etc.

Ya que la tensión proporcionada por cada una de las fotopilas es muy pequeña, aquéllas se agrupan en **serie**, disponiéndose en paneles con diversos números de fotopilas (para una tensión de 12 voltios, el panel puede tener entre 33 y 36 fotopilas).

Un panel solar de fotopilas consiste en un conjunto de discos muy delgados (las fotopilas) que se colocan en un panel compuesto por un marco, tapa de fondo y una cubierta transparente (Fig.15). A veces, para un mejor aprovechamiento del espacio, las fotopilas no son discos redondos sino que adoptan otras formas, de modo que



pueda rellenarse al máximo la superficie del panel.

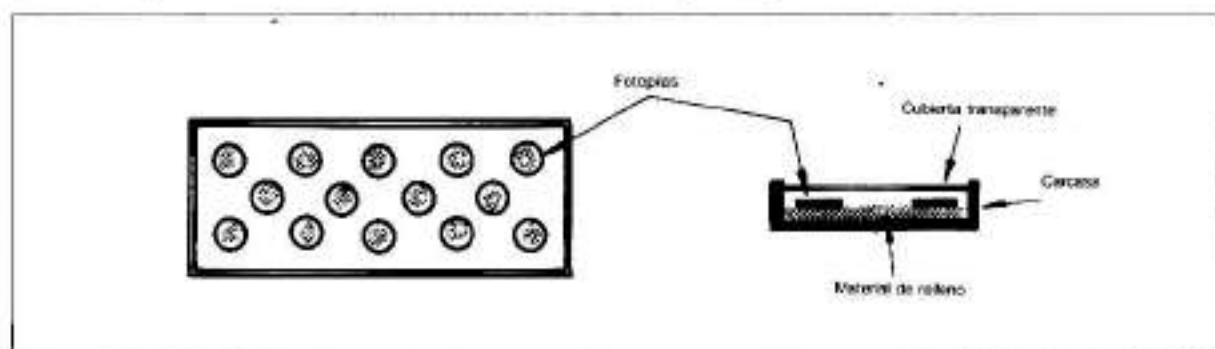


Fig. 15.—Panel solar fotovoltaico.

Un panel de fotopilas tiene un espesor de 1 cm. aproximadamente y es sumamente liviano, porque, generalmente, la cubierta transparente no es cristal sino que suele hacerse de silicona transparente, material que tiene las ventajas de no ser rígido, de estar en íntimo contacto con la fotopila (lo que ayuda a disipar el calor -recuérdese que el silicio es de color negro-azulado-) y de encerrarla herméticamente impidiendo la entrada de cualquier elemento extraño que pudiera afectar al rendimiento de la fotopila.

CURVA CARACTERÍSTICA DE UNA FOTOPILA

Una fotopila, como cualquier dispositivo eléctrico, se caracteriza por suministrar una **tensión**, una **intensidad** de corriente eléctrica y una **potencia**, que es el producto de la tensión por la intensidad.

Además de estos valores, deberemos considerar el valor de la **irradiación** y la **temperatura** de la fotopila.

En condiciones de oscuridad, la tensión suministrada es nula y la fotopila permanece inactiva.

Si mantenemos la fotopila en **circuito abierto** (desconectada, ensayo en vacío) y aumentamos el valor de la irradiación manteniendo constante la temperatura de la misma mediante refrigeración, observamos que la **tensión permanece constante** para amplios márgenes de irradiación (o iluminación). Por lo tanto, la **tensión de vacío es independiente** de la irradiación.

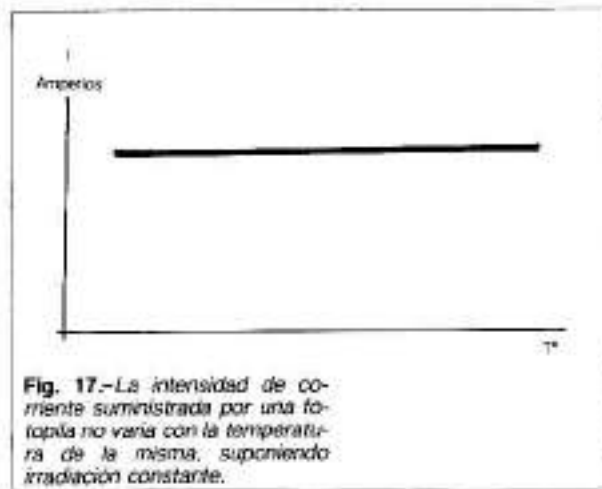
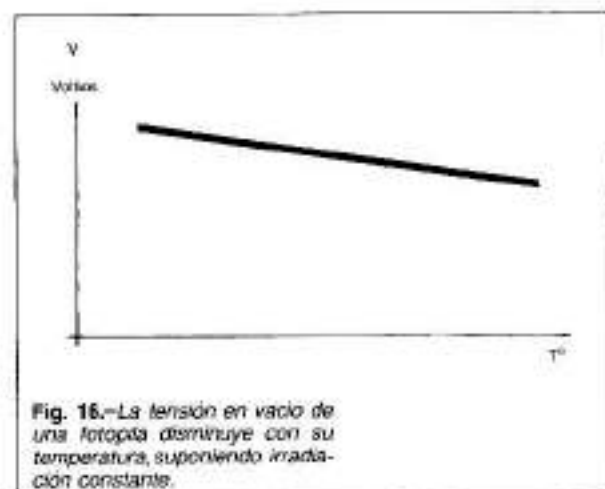


Si en estas condiciones mantenemos el valor de la irradiación fijo y variamos la temperatura de la fopopila, veremos que la tensión de vacío disminuye al aumentar la temperatura. La fopopila trabaja mejor con temperaturas bajas (Fig.16).

Ahora, podemos unir en **cortocircuito** los dos contactos superior e inferior y medir la intensidad de corriente mediante un amperímetro.

En la oscuridad, la intensidad es nula y a medida que aumentamos el valor de la irradiación, la intensidad de corriente va aumentando (manteniendo la temperatura de la fopopila constante).

Si ahora mantenemos la irradiación constante y variamos la temperatura de la fopopila, veremos que la intensidad suele permanecer constante o variar muy poco (Fig.17).



En estas dos pruebas (ensayo de vacío en circuito abierto y ensayo de cortocircuito), hemos visto como variaban algunos parámetros eléctricos de la fopopila en función de otros. En estos casos, la potencia generada es nula puesto que la potencia se calcula como el producto de la tensión por la intensidad, y en el ensayo de vacío la intensidad era nula y en el de cortocircuito la tensión es nula.

Podemos ahora unir los bornes de la fopopila a través de una resistencia eléctrica. De esta forma, la fopopila suministrará una cierta tensión y una cierta intensidad, para unos valores determinados de irradiación y temperatura,

Esta gráfica tensión-intensidad, recibe el nombre de **curva característica** y está compuesta, en condiciones usuales, por un tramo casi horizontal con pequeña pendiente, un codo y un tramo casi vertical.

La **potencia máxima** que puede suministrar corresponde a aquel valor en que el producto de la intensidad y la tensión sea máximo. Este punto de funcionamiento está situado en el **codo** de la curva característica, de forma que la intensidad y tensión correspondientes a este punto delimitan un rectángulo (producto de la intensidad y tensión) de área máxima. Estas son las condiciones óptimas de funcionamiento de la fopopila (Fig.18).

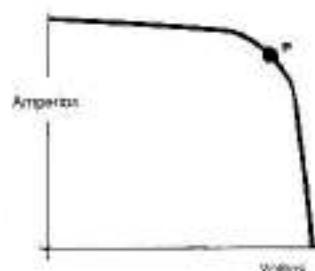


Fig. 18.—Curva característica de una fopopila. El punto P es el de máxima potencia ($P = \text{Intensidad} \times \text{Tensión}$).

RENDIMIENTO ENERGETICO DE UNA FOTOPILA

Hemos visto que, en condiciones normales de funcionamiento, la fopopila proporciona una tensión y una intensidad, de forma que el producto de ambas es la potencia suministrada por la fopopila, que se expresará en vatios.

El **rendimiento energético** viene dado por:

$$\eta = \frac{W}{SI}$$

W - potencia de la fopopila.
 S - superficie de la fopopila (m^2).
 I - irradiación (w/m^2).

Este rendimiento puede ser el máximo si la tensión y la intensidad corresponden al punto de funcionamiento de máximo rendimiento. Esta condición de potencia máxima estará asociada a un valor determinado de irradiación y a una cierta temperatura.

A lo largo del día, el valor de irradiación efectiva que recibe un panel de fopopilas es variable y, en consecuencia de lo anteriormente dicho, la **potencia eléctrica** que suministra depende de la **intensidad** que proporcione en cada momento, puesto que la tensión suele permanecer bastante constante.

Las **pérdidas** de energía de una fopopila hacen que el rendimiento global máximo, a efectos prácticos, sea del orden del 15% respecto al valor de la irradiación. Sin



embargo, este porcentaje se está viendo superado ampliamente en pruebas de laboratorio. El citado rendimiento se refiere siempre a la superficie realmente ocupada por las fotocélulas (superficie útil), que en este tipo de paneles es bastante menor que la superficie del panel (superficie total).

Las distintas pérdidas de energía que tiene una fotopila son las siguientes:

- El 23% corresponde a longitudes de onda superiores al valor umbral y que, por lo tanto, no son absorbidos por el silicio.
- El 33% corresponde a la energía solar que no produce pares electrón-hueco, pero que es absorbida por el silicio y se emplea en calentarlo (desgraciadamente, por cierto).
- El 17% restante son pérdidas de energía que se producen en la unión n-p.
- El 5% de la energía se pierde debido a la recombinación de pares electrón-hueco, los cuales se encuentran fuera de la unión n-p y no pueden separarse allí. Cuando un electrón encuentra a un hueco, se cancelan mutuamente. La única forma de que no se encuentren es que se formen cerca de la barrera de potencial, la cual los separa.
- Hasta este momento se ha perdido el 78% de la energía, que se ha empleado en calentar la fotopila. El rendimiento máximo posible es, pues, del 22%, ya que este tipo de pérdidas son inherentes al material (silicio, en este caso) y a las características de la luz del Sol (espectro solar).
- Si la luz con que se iluminase la fotopila fuera más azulada, manteniendo el mismo valor de irradiación, el rendimiento de la fotopila aumentaría de forma notable.
- Si la fotopila es iluminada con la luz de una bombilla, que tiene una mayor proporción de rojo e infrarrojo debido a la menor temperatura del filamento respecto a la del Sol, el rendimiento disminuye por causa de que gran parte de esta luz es en forma de infrarrojo y de radiación de larga longitud de onda, que produce una menor proporción de pares electrón-hueco.
- Por si fuera poco, todavía hay más pérdidas que hacen disminuir esta ya menguado 22% de rendimiento máximo que tiene una fotopila a temperatura ambiente e iluminada con la luz del Sol.
- Un 4% se pierde en la reflexión y absorción de la

superficie transparente que rodea a la célula y que es absolutamente necesario que disponga de tal cobertura.

- Aún en satélites espaciales donde no es necesario que las fotocélulas estén cubiertas, existen pérdidas motivadas por la reflexión en la superficie de la célula, debido a que ésta está relativamente pulida (debe estar pulida dado su pequeño espesor).
- Finalmente, un 3% de la energía se pierde como consecuencia del **efecto Joule**, a causa de la resistencia eléctrica interna de la fopila (principalmente del disco superior en forma de rejilla y de propio espesor del silicio). Las pérdidas por este concepto son proporcionales a la resistencia eléctrica y al cuadrado de la intensidad, como los de cualquier aparato eléctrico.
- Queda, por lo tanto, un 15% de rendimiento útil, para el caso de células de silicio (Fig.19).

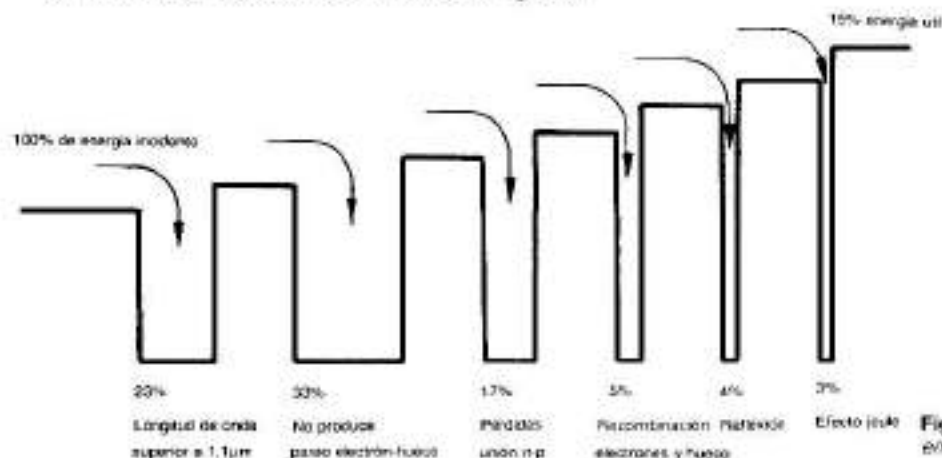


Fig. 19.- Balance de pérdidas en una fopila.

Desafortunadamente, el empleo de otros materiales no proporciona rendimientos tan elevados, si bien es posible hallar materiales que nos den rendimientos bajos pero cuyo coste sea también tan reducido que haga preferible su uso. En cualquier caso, éste es un tema en el que todavía se está investigando.

Modernamente, se han introducido técnicas especiales para aumentar el rendimiento de las fopilas solares, que si bien aún están en fase de prototipo, podrían comercializarse próximamente. Estas técnicas consisten en:

- Recubrir la fopila en su cara anterior por pirámides de material transparente en elevado índice de refracción, y en su cara posterior por un espejo. De esta manera, los fotones que entran en la fopila, y no depositan su energía en la unión n-p pueden ser reenviados por el



espejo a la unión n-p. Las pirámides, impiden que estos fotones salgan al exterior, quedando atrapados en la fotopila. Con este método se han conseguido rendimientos del 24% en fotopilas de Silicio.

- Mediante la superposición de fotopilas de Silicio con otras de arseniuro de galio, de forma que los fotones que no tienen suficiente energía para crear pares electrón-hueco en el silicio, los crean en el arseniuro de galio. De esta forma se ha llegado al 28% de rendimiento.
- Mediante el aumento de la concentración luminosa en fotopilas de Silicio.

Todas estas técnicas persiguen llegar al 44% de rendimiento, que es el máximo impuesto por la Física para fotopilas de Silicio.

DATOS DE INTERES

RENDIMIENTO DE OTROS TIPOS DE FOTOPILAS

| Material | Rendimiento teórico | Rendimiento máx. real |
|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Silicio | 44 % | 28 % |
| Fosforo de Indio | 23 % | 3 % |
| Arseniuro de Galio | 41 % | 29 % |
| Teluro de Cadmio | 21 % | 7 % |
| Fosforo de Galio | 17 % | 1 % |
| Sulfuro de Cadmio | 16 % | 7 % |

LA TABLA PERIODICA DE LOS ELEMENTOS

Todos los elementos tienen un comportamiento físico-químico determinado; si los comparamos unos con otros, hay elementos que presentan ciertas similitudes entre sí y otras grandes discrepancias.

Esa tendencia a la comparación, tan antigua como el hombre, es la base para establecer cualquier tipo de clasificación más o menos científica. Por lo que a los elementos químicos se refiere, ese empeño con criterio estrictamente científico se inició a principios del siglo XIX, con Döbereiner, que en 1819 propuso una clasificación



dada por tríos de elementos con propiedades similares. Con anterioridad ya se había llegado a la clasificación que atiende al carácter metálico o no metálico de los elementos -metales y metaloides- y se habían propuesto notaciones por medio de símbolos y fórmulas. Pero tuvo que llegarse a 1871 para avanzar más en ese campo. Fue entonces cuando el sabio ruso Mendeléiev propuso su famosa "ley periódica". Mendeléiev observó que si se ordenan los elementos según su peso atómico creciente, sus propiedades se repiten al cabo de cierto número de elementos. Esto le llevó a afirmar que **las propiedades de los elementos son una función periódica de sus pesos atómicos.**

Los elementos químicos conocidos se disponen en la Tabla Periódica de Mendeléiev. Actualmente se conocen 105 elementos clasificados de la siguiente forma:

- 78 elementos sólidos
- 2 elementos líquidos (El Bromo y el Mercurio)
- 11 elementos gaseosos
- 14 elementos preparados artificialmente (no existen en la naturaleza por el hecho de tener un período de desintegración radioactiva muy corto comparado con la edad de la Tierra)

En la Tabla Periódica, los elementos se colocan ordenados por el número atómico, es decir, por la cantidad de protones que tienen en el núcleo. Sin embargo, la disposición no es regular y se prefiere hablar de columnas. Los elementos situados en una misma columna exhiben propiedades similares que varían paulatinamente conforme subimos o bajamos en la columna.

A la izquierda de la tabla, en la columna Ia, se encuentran los metales alcalinos, blandos, buenos conductores del calor y muy reactivos químicamente. Le siguen los alcalinotérreos de la columna IIa que son ya más duros y menos reactivos. En las columnas IIIb, IVb, Vb, VIb y VIIb figuran los llamados metales frágiles, y muchos de estos elementos intervienen en aleaciones en forma minoritaria. El grupo VIII, llamado del hierro, tiene 3 columnas y juntamente con la columna Ib contiene los metales dúctiles que intervienen como componentes mayoritarios en muchas aleaciones. La columna IIb incluye metales de punto de fusión bajo. La columna IIIa contiene metales y no metales. La distinción entre metal y no metal se efectúa a base de criterios de conductividad térmica y eléctrica. En esta columna, a excepción del aluminio, los demás elementos son muy escasos.



La columna IVa tiene en el carbono y silicio sus componentes más importantes, además del estaño y el plomo. Estos elementos poseen 4 electrones en su última capa, por lo que al combinarse químicamente pueden tanto perder estos electrones como ganar otros 4 a fin de tener la última capa con 8 electrones, lo que representa la máxima estabilidad. Por esta razón estos elementos (Carbono y Silicio) son básicos en Biología y Mineralogía, y presentan infinidad de compuestos.

Las columnas Va y VIa, encabezadas respectivamente por el nitrógeno y oxígeno, tienen un acentuado carácter no metálico.

La columna VIIa es la de los halógenos, elementos altamente reactivos desde el punto de vista químico y, por tanto, al igual que los metales alcalinos, muy agresivos en estado puro. La mayoría de estos elementos forman sales, en especial con los metales alcalinos y alcalino-térreos.

La columna 0 es la de los gases nobles. Estos elementos tienen completa su última capa electrónica, lo que hace que no tengan ninguna apetencia a perder o ganar electrones, siendo, por lo tanto, sumamente inertes, razón por la cual encuentran algunas aplicaciones.

La Tabla periódica se completa con los grupos de los Lantánidos y Actínidos. Son éstos dos grupos de elementos que pertenecen a la columna IIb y que, por lo tanto, son bastante parecidos entre sí dentro de cada grupo. Varios de ellos tienen importantes aplicaciones técnicas.

Metales ligeros

CLASIFICACIÓN PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

Gases inertes
VII A

| I A | | II A | | Elementos de transición | | | | | | | | | | | | | | | | Gases inertes VII A | | | | |
|--------|--------|-------------------------|---------|-------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|---------------------|--|--|--|--|
| | | | | No metales | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | III A | IV A | V A | VI A | VII A | | | | | | | | VI A | VII A | VIII A | IX A | X A | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | | | | |
| H | He | Li | Be | B | C | N | O | F | Ne | Na | Mg | Al | Si | P | S | Cl | Ar | K | Ca | | | | | |
| 1.0079 | 4.0026 | 6.941 | 9.0122 | 10.811 | 12.011 | 14.007 | 15.999 | 18.998 | 20.179 | 22.990 | 24.305 | 26.982 | 28.086 | 30.974 | 32.06 | 35.453 | 39.948 | 39.098 | 40.078 | | | | | |
| | | Elementos de transición | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | III B | IV B | V B | VI B | VII B | VIII B | | | | | IB | II B | | | | | | | | | | | |
| | | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | | | | | |
| | | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | Rb | Sr | | | | | |
| | | 44.956 | 47.88 | 50.942 | 51.996 | 54.938 | 55.847 | 58.933 | 58.71 | 63.546 | 65.38 | 69.723 | 72.63 | 74.922 | 78.96 | 79.904 | 83.80 | 85.468 | 87.62 | | | | | |
| | | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | | | | | |
| | | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | Ba | La | | | | | |
| | | 88.906 | 91.224 | 92.906 | 95.94 | 97 | 101.07 | 101.07 | 106.36 | 106.36 | 112.41 | 114.82 | 118.71 | 127.3 | 127.6 | 126.905 | 131.29 | 137.33 | 138.905 | | | | | |
| | | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | | | | |
| | | Er | Tm | Yb | Lu | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | | | | |
| | | 173.054 | 174.967 | 175.942 | 176.93 | 178.49 | 180.948 | 183.85 | 186.207 | 188.906 | 191.224 | 193.224 | 195.084 | 196.967 | 200.59 | 204.37 | 208.98 | 209 | 210 | 210 | | | | |
| | | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | | | | | | | | | | | | | |
| | | Fr | Ra | Ac | Th | Pa | U | Np | Pu | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | | | | | |
| | | 223 | 226 | 227 | 232 | 231 | 238 | 237 | 244 | 244 | 247 | | | | | | | | | | | | | |



| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|---------------|
| Lantánidos | 03 | 08 | 09 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| | Ce 140,2 | Pr 140,9077 | Nd 144,24 | Pm 147 | Sm 150,36 | Eu 151,96 | Gd 157,25 | Tb 158,9253 | Dy 162,50 | Ho 164,93032 | Er 167,26 | Tm 168,93402 | Yb 173,054 | Lu 174,967 |
| Actínidos | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| | Th 232,0381 | Pa 231 | U 238,02891 | Np 237 | Pu 244 | Am 243 | Cm 247 | Bk 247 | Cf 251 | Es 252 | Fm 257 | Md 288 | No 289 | Lr 260 |

NOTACION

Z = N.º atómico

A = Símbolo

Nota atómica
2 - 14000

TABLA ALFABETICA DE LOS ELEMENTOS

| Número | Símbolo | Número atómico | Masa atómica (en u.m.a.) | Punto de fusión (°C) | Punto de ebullición (°C) | Densidad (g/cm ³) | Estados de oxidación (Valencia) | Electro negatividad (escala Pauling) |
|------------|---------|----------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Actinio | Ac | 89 | 227 | 1.050 | — | — | 3 | 1,1 |
| Aluminio | Al | 13 | 26,9815 | 459,7 | 2.450 | 2.699 | 3 | 1,5 |
| Americio | Am | 95 | 243 | — | — | 11,7 | 6,5,4,3 | — |
| Antimonio | Sb | 51 | 121,76 | 630,5 | 1.380 | 6,62 | ±3,5 | 1,9 |
| Argón | Ar | 18 | 39,95 | -189,4 | -185,7 | 1,40 (**) | 0 | — |
| Arsénico | As | 33 | 74,91 | 817 | 613 (*) | 5,73 | ±3,5 | 2,0 |
| Astato | At | 85 | 210 | — | — | — | — | 2,2 |
| Azufre | S | 16 | 32,064 | 119,0 | 444,8 | 2,07 | 6,3,4,-2 | 2,5 |
| Bario | Ba | 56 | 137,36 | 714 | 1.640 | 3,5 | 2 | 0,9 |
| Berilio | Be | 4 | 9,013 | 1.280 | 2.770 | 1,8 | 2 | 1,5 |
| Bericio | Bk | 97 | 247 | — | — | — | 4,3 | — |
| Bismuto | Bi | 83 | 208,980 | 271,3 | 1.160 | 9,18 | 5,3 | 1,9 |
| Boro | B | 5 | 10,82 | 2.030 | 2.550 (*) | 2,34 | 3 | 2,0 |
| Bromo | Br | 35 | 79,91 | -7,2 | 58,78 | 3,12 | ±4,4,5 | 2,8 |
| Cadmio | Cd | 48 | 112,41 | 320,9 | 767 | 8,65 | 2 | 1,7 |
| Calcio | Ca | 20 | 40,08 | 838 | 1.440 | 1,55 | 2 | 1,0 |
| California | Cf | 98 | 251 | — | — | — | 3 | — |
| Carbono | C | 6 | 12,01115 | 3.727 | 4.830 | 2,26 | ±4,2 | 2,5 |
| Cerio | Ce | 58 | 140,13 | 795 | 3.468 | 6,90 | 5,4 | 1,1 |
| Cesio | Cs | 55 | 132,91 | 28,5 | 670 | 1,90 | 1 | 0,7 |
| Cinc | Zn | 30 | 65,38 | 419,5 | 907 | 7,14 | 2 | 1,6 |
| Circonio | Zr | 40 | 91,22 | 1.852 | 3.580 | 6,49 | 4 | 1,4 |
| Cloro | Cl | 17 | 35,453 | -101,0 | -34,6 | 1,56 (**) | ±1,4,5,6,7 | 3,0 |
| Cobalto | Co | 27 | 58,94 | 1.490 | 2.900 | 8,5 | 2,3 | 1,8 |
| Cobre | Cu | 29 | 63,54 | 1.083 | 2.595 | 8,93 | 2,1 | 1,9 |
| Criptón | Kr | 36 | 83,80 | -157 | -152,9 | 2,6 (**) | 0 | — |
| Cromo | Cr | 24 | 52,00 | 1.875 | 2.665 | 7,1 | 6,3,2 | 1,6 |
| Curo | Cm | 96 | 247 | — | — | — | 3 | — |
| Disprosio | Dy | 66 | 162,51 | 1.407 | 2.800 | 8,54 | 3 | — |
| Einsteinio | Es | 99 | 254 | — | — | — | — | — |
| Erbio | Er | 68 | 167,27 | 1.497 | 2.900 | 9,65 | 3 | 1,2 |
| Escandio | Sc | 21 | 44,96 | 1.534 | 2.130 | 3,0 | 3 | 1,3 |
| Estao | Sn | 50 | 118,70 | 231,89 | 2.360 | 7,31 | 4,2 | 1,8 |
| Estroncio | Sr | 38 | 87,63 | 168 | 1.380 | 2,6 | 2 | 1,0 |
| Europio | Eu | 63 | 151,96 | 826 | 1.439 | 5,26 | 3,2 | — |
| Fenicio | Fm | 100 | 253 | — | — | — | — | — |
| Flúor | F | 9 | 19,00 | -219,6 | -188,2 | 1,18 (**) | -1 | 4,0 |
| Fósforo | P | 15 | 30,9738 | 44,1 | 280 | 1,82 | ±3,3,4 | 2,1 |
| Francio | Fr | 87 | 223 | 27 | — | -7 | 1 | 0,7 |
| Gadolinio | Gd | 64 | 157,26 | 1.312 | 3.000 | 7,89 | 3 | 1,1 |
| Galio | Ga | 31 | 69,72 | 29,75 | 2.137 | 5,91 | 3 | 1,6 |
| Alemánico | Ge | 32 | 72,60 | 937,4 | 2.430 | 5,34 | 4 | 1,8 |
| Hafnio | Hf | 72 | 178,49 | 2.222 | 5.400 | 13,3 | 4 | 1,3 |
| Hafnio | Hf | 105 | 260 | — | — | — | — | — |
| Halo | He | 2 | 4,0026 | -269,7 | -268,9 | 0,126 (**) | 0 | — |
| Hidrógeno | H | 1 | 1,008 | -252,2 | -252,7 | 0,071 (**) | 1 | 2,1 |
| Hierro | Fe | 26 | 55,85 | 1.535 | 3.000 | 7,86 | 2,3 | 1,8 |
| Holmio | Ho | 67 | 164,94 | 1.461 | 2.600 | 8,80 | 3 | 1,2 |
| Indio | In | 49 | 114,82 | 155 | 2.000 | 7,28 | 3 | 1,7 |
| Indio | In | 77 | 192,2 | 2.150 | 5.630 | 22,42 | ±3,4,6 | 2,2 |

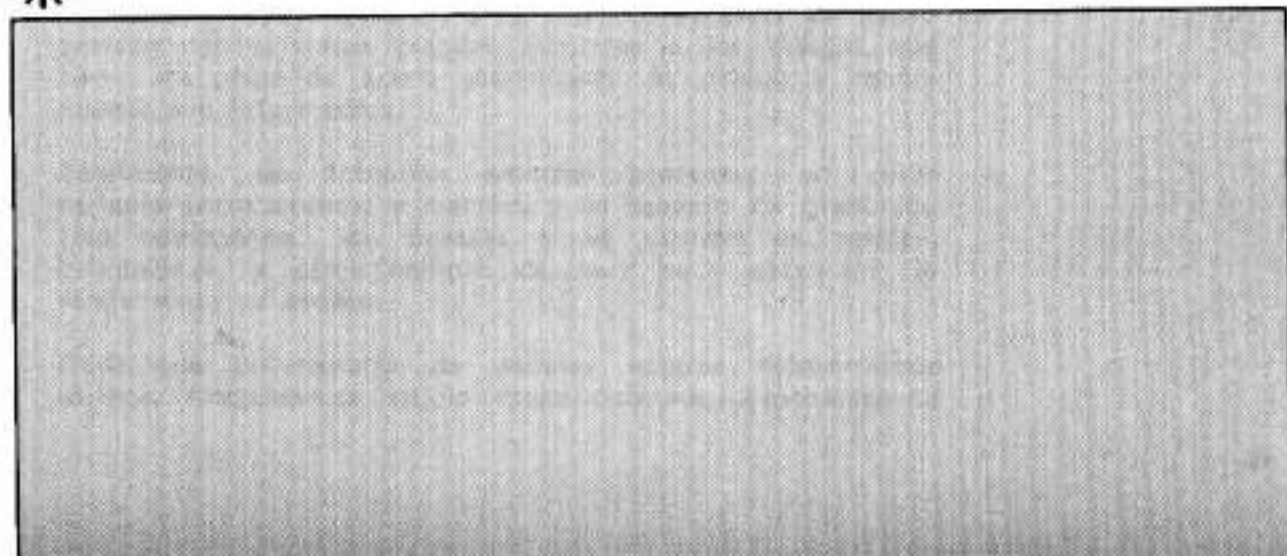


| | | | | | | | | |
|-------------|----|-----|---------|---------|--------|-----------|------------|-----|
| Iterbio | Yb | 70 | 173,84 | 824 | 1.427 | 1,98 | 3,2 | 1,1 |
| Itrio | Y | 39 | 88,91 | 1.490 | 2.927 | 4,47 | 3 | 1,3 |
| Kurchatov | Kh | 104 | 261 | — | — | — | — | — |
| Lantano | La | 57 | 138,92 | 920 | 3.470 | 1,355 | 3 | 1,1 |
| Lawrencio | Lw | 103 | 257 | — | — | — | — | — |
| Litio | Li | 3 | 6,94 | 108,6 | 1.330 | 2,534 | 1 | 1,0 |
| Lutecio | Lu | 71 | 174,99 | 1.652 | 3.327 | 9,84 | 3 | 1,2 |
| Magnesio | Mg | 12 | 24,31 | 651 | 1.110 | 1,74 | 1 | 1,2 |
| Manganeso | Mn | 25 | 54,94 | 1.260 | 2.150 | 7,43 | 7,6,4,2,3 | 1,5 |
| Mendelevio | Md | 107 | 256 | — | — | — | — | — |
| Mercurio | Hg | 80 | 200,61 | -38,4 | 356,9 | 11,546 | 2,1 | 1,9 |
| Molibdeno | Mo | 42 | 95,95 | 2.620 | 5.560 | 18,2 | 6,5,4,3,2 | 1,8 |
| Neodimio | Nd | 60 | 144,24 | 1.024 | 3.027 | 7,00 | 3 | 1,2 |
| Neón | Ne | 10 | 20,183 | -248,67 | -245,9 | 1,20 (**) | 8 | — |
| Neptunio | Np | 93 | 237 | 637 | — | 19,5 | 6,5,4,3 | 1,3 |
| Niobio | Nb | 41 | 92,91 | 2.415 | 3.300 | 8,4 | 5,3 | 1,6 |
| Niquel | Ni | 28 | 58,71 | 1.455 | 2.794 | 8,90 | 2,3 | 1,4 |
| Nitrogeno | N | 7 | 14,01 | -209,86 | -195,8 | 8,81 (**) | ±3,5,4,2 | 3,0 |
| Nobelio | No | 102 | 253 | — | — | — | — | — |
| Oro | Au | 79 | 196,97 | 1.863 | 2.974 | 19,32 | 3,1 | 2,4 |
| Osmio | Os | 76 | 190,22 | 2.700 | 5.900 | 22,6 | 2,3,4,6,8 | 2,2 |
| Oxigeno | O | 8 | 16,0000 | -218,8 | -183,0 | 1,14 (**) | -2 | 3,5 |
| Paladio | Pd | 46 | 106,4 | 1.553 | 3.080 | 12,0 | 2,4 | 2,2 |
| Plata | Ag | 47 | 107,88 | 960,5 | 2.210 | 18,50 | 1 | 1,9 |
| Platino | Pt | 78 | 195,09 | 1.773,5 | 4.530 | 21,37 | 2,4 | 2,2 |
| Plomo | Pb | 82 | 207,19 | 327,4 | 1.725 | 11,35 | 4,2 | 1,8 |
| Plutonio | Pu | 94 | 242 | 640 | 3.235 | — | 6,5,4,3 | — |
| Polonio | Po | 84 | 210 | 254 | — | — | 4,2 | 2,0 |
| Potasio | K | 19 | 39,102 | 62,3 | 369 | 0,87 | 1 | 0,8 |
| Praseodimio | Pr | 59 | 140,92 | 940 | 3.127 | 6,5 | 3,4 | 1,1 |
| Promecio | Pm | 61 | 147 | — | — | — | 3 | — |
| Protactinio | Pa | 91 | 231 | — | — | 15,4 | 5,4 | 1,5 |
| Radio | Ra | 88 | 226 | 700 | — | 5,0 | 2 | 0,9 |
| Rádior | Rn | 86 | 222 | -71 | -61,8 | — | 0 | — |
| Renio | Re | 75 | 186,22 | 2.180 | 5.900 | 21,0 | 7,6,4,2,-1 | 1,9 |
| Rodio | Rh | 45 | 102,91 | 1.985 | 4.500 | 12,5 | 2,3,4 | 2,2 |
| Rubidio | Rb | 37 | 85,48 | 38,5 | 700 | 1,53 | 1 | 0,8 |
| Rutenio | Ru | 44 | 101,07 | 2.450 | 4.900 | 12,2 | 2,3,4,6,8 | 2,2 |
| Samario | Sm | 62 | 150,35 | 1.072 | 1.900 | 7,7 | 3,2 | 1,2 |
| Selenio | Se | 34 | 78,96 | 220 | 688 | 4,8 | 6,4,-2 | 2,4 |
| Silicio | Si | 14 | 28,09 | 1.420 | 2.600 | 2,33 | 4 | 1,8 |
| Sodio | Na | 11 | 22,99 | 97,5 | 880 | 0,971 | 1 | 0,9 |
| Talio | Tl | 81 | 204,39 | 303,5 | 1.457 | 11,83 | 3,1 | 1,8 |
| Tantalio | Ta | 73 | 180,95 | 2.996 | 5.425 | 18,6 | 5 | 1,5 |
| Tecnecio | Tc | 43 | 99 | 2.200 | — | 11,5 | 7 | 1,9 |
| Terbio | Tb | 52 | 127,61 | 452 | 989,8 | 6,24 | 6,4,-2 | 2,1 |
| Terbio | Tb | 65 | 158,93 | 1.356 | 2.800 | 8,27 | 3,4 | 1,2 |
| Tiatio | Ti | 22 | 47,90 | 1.668 | 3.200 | 4,5 | 4,3 | 1,5 |
| Torio | Th | 90 | 232,05 | 1.750 | 3.850 | 11,7 | 4 | 1,3 |
| Tulio | Tm | 69 | 168,94 | 1.543 | 1.727 | 9,33 | 3,2 | 1,2 |
| Uranio | U | 92 | 238,07 | 1.150 | 3.818 | 19,07 | 6,5,4,3 | 1,7 |
| Vanadio | V | 23 | 50,942 | 1.900 | 3.450 | 8,1 | 5,4,3,2 | 1,6 |
| Volfranio | W | 74 | 183,86 | 3.370 | 5.900 | 19,3 | 6,5,4,3,2 | 1,7 |
| Xenón | Xe | 54 | 131,30 | -112 | -108 | 3,06 (**) | 0 | — |
| Yodo | I | 53 | 126,91 | 113,7 | 183 | 4,94 | ±1,4,5,7 | 2,5 |

(*) Sublimo.

(**) Se trata de un gas, y la densidad indicada corresponde a la fase líquida.

LECCION 29



29. PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

INTRODUCCION

En esta lección se examinan las características de los paneles fotovoltaicos, tanto normales como especiales, así como el proceso industrial de fabricación de las fotopilas.

FABRICACION DE FOTOPILAS

La fabricación de fotopilas es un proceso de **alta tecnología**, con unos fundamentos relativamente sencillos, pero que requiere para su perfección instalaciones muy sofisticadas y condiciones de **extrema pureza**.

Los procesos de purificación del silicio son complejos, especialmente en la última fase de obtención del silicio ultrapuro, y exigen **costes importantes** tanto en los materiales como en la mano de obra, controles de calidad, etc.

Actualmente se fabrican fotopilas de silicio monocristalino, silicio policristalino y silicio amorfo. Las fotopilas monocristalinas son redondas (o sectores redondos). Su aspecto visual es homogéneo negro-azulado. Su precio y rendimiento son elevados.

Las fotopilas policristalinas se comercializan en placas cuadradas o rectangulares, y su aspecto exterior es negro azulado con cristales grandes similares a los dibujos que tiene una placa de acero galvanizado. Su precio y rendimiento son intermedios.

Finalmente, las fotopilas amorfas presentan un color variable entre azulado y marrón, y un aspecto de granulado fino homogéneo. Son baratas y se utilizan en relojes, calculadoras, y otros equipos de muy poca potencia. Su rendimiento es escaso.

Dado que la mayoría de paneles solares fotovoltaicos utilizan fotopilas de silicio monocristalino, exponemos a

continuación el proceso de fabricación de estas fotopilas.

Una vez obtenido el silicio ultrapuro, se le añaden **pequeñas cantidades** de impurezas, por ejemplo boro, de forma que el material sea de tipo p (puede hacerse lo mismo con impurezas de tipo n, tales como fósforo).



Fig. 1.- Monocristal de silicio. Es un cilindro más o menos rugoso.

El primer paso es la obtención de un **monocristal** (cristal único) de material de tipo p. Dado que la proporción de impurezas es generalmente muy pequeña, el cristal obtenido tiene las mismas propiedades cristalográficas que el silicio puro. El proceso consiste en depositar un cristalito pequeño del mismo material en silicio dopado fundido a punto de solidificar. La solidificación ha de hacerse muy lentamente, y da lugar a que átomos que se van solidificando se depositen ordenadamente sobre el cristal germen, con lo que éste aumenta de tamaño. Mediante técnicas adecuadas se consigue que el monocristal obtenido tenga forma cilíndrica (Fig. 1). Este cilindro monocristalino de material (en este caso p) presenta una distribución uniforme de todos sus átomos a lo largo de las tres direcciones del espacio (su periferia es rugosa y no tiene, como podría pensarse, forma geométrica definida como un cristal de cuarzo). Este cilindro es sometido a un **rectificado** en un torno, al objeto de dejarlo totalmente liso en su superficie.

El siguiente paso consiste en **cortar** este cilindro en rodajas, al igual que si se tratara de un embutido, empleándose para ello una sierra de diamante que permite obtener discos de espesor muy delgado.



Fig. 2.- Disco de silicio para una fotopila, una vez torneado y pulido.

Seguidamente, estos discos son **pulidos** por ambas caras al objeto de eliminar imperfecciones que se hubieran originado durante su serrado. Con este pulido, los discos se hacen todavía de menor espesor (Fig. 2).

En la lección anterior dijimos que una fotopila constaba de dos discos de distinto material, uno p y otro n. Si ahora se hubiera obtenido otro disco de material de tipo n, sencillamente uniendo los dos discos tendríamos constituida la fotopila.

Esto **no puede hacerse** debido a que el espesor de la capa superior había de ser **extremadamente delgado** para poder dejar paso a la luz, puesto que el silicio es transiúcido.

La obtención de discos tan delgados es prácticamente

imposible de conseguir con la tecnología actual (este disco debería tener 2 milésimas de milímetro). Lo que se hace es producir un **crecimiento epitaxial** en una de las caras del disco de material del tipo p.

El crecimiento epitaxial consiste en disponer **vapor de silicio e impurezas del tipo n** (fósforo, por ejemplo) de forma que se vayan depositando sobre una de las caras del disco. Al final del proceso, el resultado es la obtención de una capa de material de tipo n sobre el disco de material de tipo p. Controlando cuidadosamente las condiciones de trabajo, se puede conseguir una capa del espesor adecuado.

Este proceso se realiza en el interior de un horno donde se introducen los discos y se hace el vacío. Seguidamente, se inyecta vapor de tetracloruro de silicio (SiCl_4), hidrógeno (H_2) e hidruro de fósforo (PH_3), y se calienta a unos 1100°C . El tetracloruro de silicio se descompone, dando silicio que va depositándose sobre el disco, e igualmente le ocurre al hidruro de fósforo, que se descompone dando fósforo. El cloro reacciona con el hidrógeno produciendo ácido clorhídrico, el cual no ataca al silicio. Estos vapores de ácido clorhídrico se eliminan mediante una continua **aspiración** de los gases del horno (Fig.3).

Una vez enfriado, el disco primitivo de material p contiene en su cara superior (la inferior se protege para que no le afecten los vapores del horno) una **delgadísima capa de material de tipo n**. Debido al mayor espesor de la capa primitiva, este disco tiene el espesor de una hoja de papel; aunque es muy frágil, resulta manejable (aproximadamente $20\ \mu\text{m}$).

Este disco sufre un pulido en su cara de material de tipo n (creada en el horno) y seguidamente soporta un proceso de **metalización**, por el cual en la parte inferior se le crea una capa de metal (generalmente aluminio o plata) y en la superior una rejilla (Fig.4).

Para crear la rejilla, se **pinta** la cara superior de la fopila con una **emulsión especial fotográfica** y se le proyecta mediante un sistema óptico el dibujo de la rejilla. Una vez revelado, en la parte donde ha habido luz se ha formado una capa especial en la que no se adherirá el metal.

La **metalización** se lleva a cabo en un horno a alto vacío en el cual se hace vaporizar el metal. Este metal vaporiza-

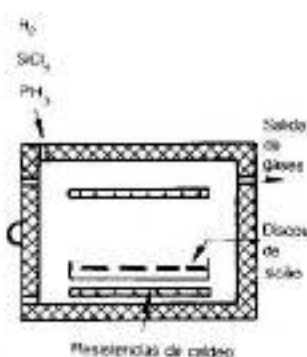


Fig. 3.- Horno para el tratamiento de fopilas.

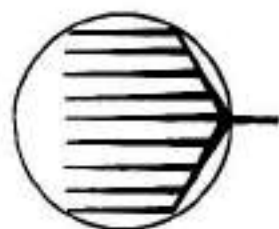


Fig. 4.- Rejilla de la fopila (cara iluminada).

do se condensa sobre las partes no tratadas fotográficamente, adhiriéndose fuertemente al silicio mientras que no se adhiere sobre el material fotográfico.

Una vez realizada la metalización, se procede a un **lavado** mediante el que se elimina la capa de emulsión fotográfica y el posible metal que en ella hubiese, quedando la fopila lista para su uso.

ENCAPSULADO DEL PANEL

Las fopilas así obtenidas deben unirse en **serie**, de forma que se sumen las tensiones que suministran cada una de ellas.

Para una instalación de 12 voltios, el panel solar fotovoltaico debe proporcionar unos 13,5 V. a fin de poder cargar la batería, lo que para un voltaje promedio de 0,45 V. por fopila, da como resultado la necesidad de 30 fopilas por panel.

Pero, además, existe en el propio panel un **diodo de bloqueo**, que tiene una caída de tensión de unos 0,6 V. Hay que contar con la caída de tensión como consecuencia de la **resistencia eléctrica interna** de la fopila, principalmente en el propio espesor de la fopila y en las rejillas. Todo esto hace que tenga que aumentarse el número a 33 fopilas, como mínimo, siendo usuales los paneles solares de 33 a 36 fopilas para aplicaciones de 12 V. (Fig.5).

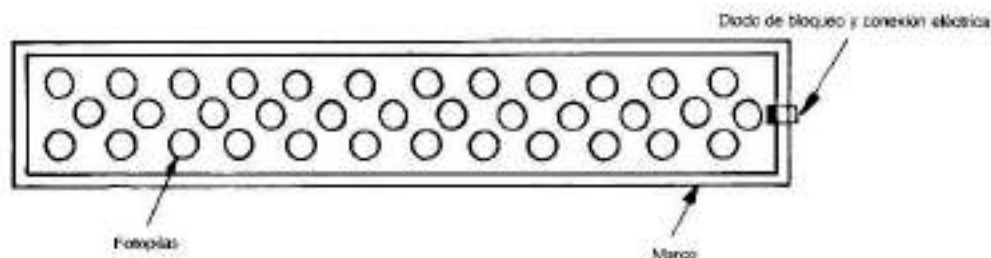


Fig. 5.-Panel solar fotovoltaico de 30 fopilas para 12 voltios.

Las fopilas se encapsulan en el panel de diversas formas, según el fabricante. Una forma muy acertada es situarlas en el **interior de silicona transparente**, que realiza un perfecta sellado de las mismas frente al polvo,

agua de lluvia, etc. No obstante, también son frecuentes disposiciones en las cuales las fopilas se encuentran bajo un cristal o plástico transparente. En este caso se han de extremar las precauciones de estanqueidad.

Los terminales eléctricos de las fopilas están unidos entre sí mediante soldadura, generalmente ultrasónica o de impacto, de forma que la continuidad eléctrica del circuito esté garantizada en todo momento.

La parte posterior de un panel de fopilas es el lugar por donde se puede eliminar el calor. Por ello, es frecuente que la placa del fondo sea metálica y esté provista de aletas, a fin de facilitar la rápida transmisión del calor por convección (Fig.6).

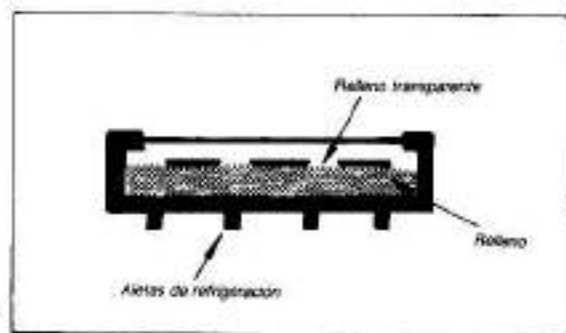


Fig. 6.—Corte de un panel fotovoltaico.

El calor se produce como consecuencia de que la energía solar no es aprovechada en su totalidad (se pierde aproximadamente el 85% de ella). Este calor debe eliminarse puesto que las fopilas presentan mejor rendimiento a bajas temperaturas.

Los paneles de energía solar fotovoltaicos suelen ser **muy delgados** y esto hace que exista peligro en caso de vientos huracanados. Si no están bien sujetos, pueden flexionarse. La **flexión** del panel podría producir la rotura de alguna de las fotocélulas, con las graves consecuencias que ello tendría. Por esta razón, los paneles suelen llevar unas nervaduras (que generalmente son las aletas posteriores de disipación de calor) que les dan la suficiente rigidez mecánica.

DIODO DE BLOQUEO

En condiciones de iluminación, las fopilas proporcionan energía eléctrica al receptor. Lo usual es que este recep-

tor sea una batería, la cual se va cargando mientras las fopilas están iluminadas y se descarga cuando se realiza un consumo eléctrico, tal como encender una bombilla.

Para que se cargue la batería, el panel solar fotovoltaico debe proporcionar una tensión algo mayor que la que suministra la batería. Ahora bien, en períodos de **oscuridad** la batería se **descargaría** sobre el panel solar fotovoltaico calentando las fopilas como si se tratase de una resistencia eléctrica. Para evitar que esto suceda se coloca un **diodo de bloqueo**, que es un elemento que sólo permite el paso de la corriente en un sentido: el del panel a la batería, impidiéndolo en sentido contrario.

El diodo de bloqueo, como cualquier diodo, presenta una caída de tensión de unos 0.6 voltios. Es decir: para que la corriente circule a través de él, debe superar la barrera de potencial de la unión n-p, que tiene ese valor de 0.6 voltios; esto obliga a tener que disponer de 1 a 2 fopilas más en serie para compensar este efecto, si bien estas fopilas suplementarias son útiles en el sentido de que proporcionan potencia eléctrica aprovechable (las pérdidas en el diodo son pequeñas) y estas fopilas suplementarias sólo se utilizan para sobrepasar la barrera de potencial.

Para instalaciones de 60 voltios o de menos voltaje, existen diodos especiales con una caída de tensión más pequeña de alrededor de 0.3 voltios, por lo que suelen utilizarse de este tipo. (Diodo de Schottky).

Los diodos de bloqueo se **instalan dentro del propio panel solar fotovoltaico**, por lo que al comprar un panel no hay que preocuparse por la posible descarga de la batería, puesto que cada panel lleva incorporado su propio diodo de bloqueo.

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE CONCENTRACION

Ya hemos visto que el máximo rendimiento de una fopila de silicio era del 15%, y que la tensión que proporcionaba era prácticamente constante dentro de amplios niveles de iluminación.

La intensidad de corriente eléctrica, en cambio, dependía del nivel de iluminación y del área de la fopopila.

Una fopopila de área doble puede proporcionar el doble de intensidad de corriente eléctrica. De aquí la tendencia observada a aumentar el diámetro de las fopopilas, siendo usual el tamaño de 10 cms. de diámetro cuando hace algunos años las mayores eran de 5 cms de diámetro.

Otra manera de aumentar la intensidad de corriente (y con ello la potencia suministrada por la fopopila) es **aumentar el valor de la irradiación**. Al aumentar el valor de la irradiación, se aumenta el número de fotones que recibe la unidad de área, con lo cual pueden crearse más pares electrón-hueco y la intensidad de corriente aumenta.

El aumentar el valor de la irradiación mediante lentes o espejos lleva consigo el hecho de que la fopopila se **caliente** mucho más; de ahí la necesidad de su **refrigeración** (Fig.7).

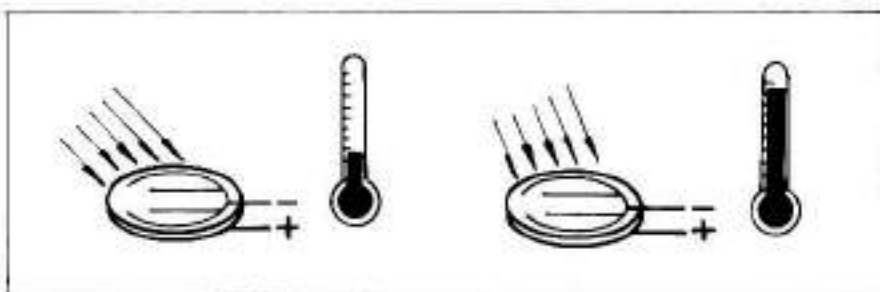


Fig. 7.—Una fopopila con valores elevados de irradiación precisa refrigerarse.

Por otro lado, existe una limitación intrínseca de la propia fopopila, que **se satura** en la producción de pares electrón-hueco para valores de irradiación superiores a unas 120 veces el valor de la irradiación normal, por lo que utilizar factores de concentración superiores a este valor resulta inadecuado al no obtenerse ningún provecho útil.

La utilización de sistemas de concentración en aplicaciones fotovoltaicas tiene un gran interés debido al **elevado coste** de las fopopilas.

En efecto, para disponer de una determinada potencia, se pueden utilizar dos sistemas:

- Gran superficie de fopopilas en paneles solares planos.
- Pequeña superficie de fopopilas en concentradores solares.

Obsérvese que la superficie que se precisa reservar para cualquiera de los dos sistemas es aproximadamente la misma, puesto que la superficie ocupada por los paneles será similar a la ocupada por las lentes o espejos. La diferencia estriba en la superficie ocupada por las fopipilas, que en el primer caso es considerable, con un coste económico importante, mientras que en el segundo caso mediante una sola fopipila, cuyo precio unitario es muy reducido, se puede conseguir la misma potencia.

Dadas las reducidas dimensiones de la fopipila, los sistemas de concentración suelen emplear **lentes**, elementos que en sistemas térmicos no son utilizados (Fig.8).

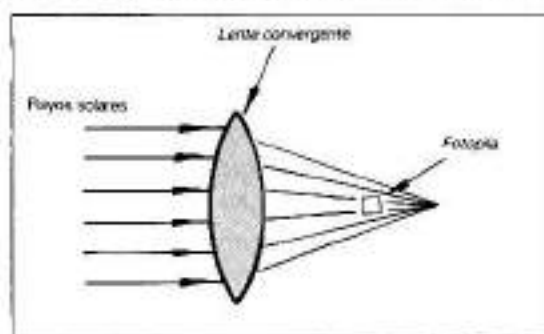


Fig. 8.—Las lentes son usadas para la concentración solar en fopipilas.

La ventaja de usar una lente para conseguir la concentración de los rayos solares estriba en el hecho de que las fopipilas son redondas y, dado que las lentes suelen ser también redondas, la concentración de una lente en las proximidades del foco es también redonda, cubriendo perfectamente toda la superficie de la fopipila. Debe hacerse notar que la fopipila **jamás** debe ocupar el foco de la lente, pues en este caso el factor de concentración es tan elevado (varios miles de veces) que harían que el elevadísimo valor de la irradiación destruyera la fopipila. Normalmente, las fopipilas se colocan **antes del foco** de la lente.

Ya hemos dicho que en colectores de concentración la fopipila debe ir **refrigerada**. Esta refrigeración puede realizarse usualmente haciendo pasar agua por debajo de la fopipila (con la conveniente separación, evidentemente).

En este caso, podemos disponer de un colector solar que nos proporciona simultáneamente electricidad y agua caliente.

El rendimiento de un sistema de este tipo (**termofotovoltaico**) es más elevado que la utilización de paneles solares

planos para obtener agua caliente y paneles fotovoltaicos para obtener electricidad, debido a que se utiliza menos superficie.

En el supuesto de que las superficies de paneles (área total) de los sistemas térmico (por ejemplo, para agua caliente sanitaria) y del sistema fotovoltaico sean similares, un sistema termofotovoltaico equivalente tendría la misma superficie que uno de ellos (o sea, la mitad de la superficie ocupada por los sistemas térmico y fotovoltaico, conjuntamente) y tendría un rendimiento aproximadamente de un 10-12% en electricidad y de un 50% en calor, siendo mucho más económico que la utilización de los dos sistemas (térmico y fotovoltaico) por separado (Fig.9).

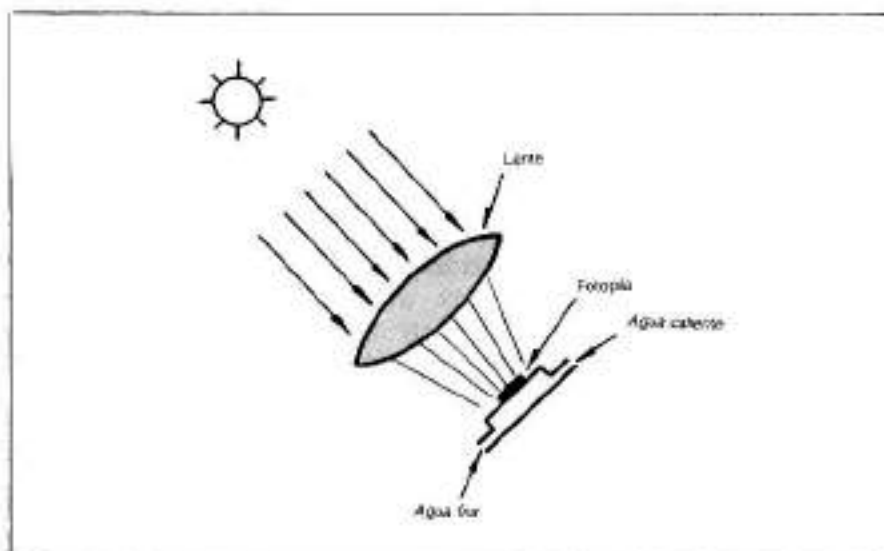


Fig. 9.- Sistema termofotovoltaico. Produce electricidad y agua caliente.

El menor rendimiento en la producción de electricidad se debe al hecho de que para tener agua caliente, la fotopila debe estar a una cierta temperatura (siempre algo mayor a la de salida del agua caliente) y ya sabemos que un aumento de temperatura disminuye el rendimiento.

Las lentes utilizadas en estos sistemas son las llamadas **lentes de Fresnel**, que son **lentes convergentes planas** que suelen realizarse de material plástico y con una tecnología similar a la utilizada en la fabricación de discos musicales.

Una lente de Fresnel consta de una lámina transparente en la que una de las caras es plana y la otra consta de una serie de **facetas** dispuestas en círculos concéntricos. El ángulo de las facetas va variando desde el exterior

(muy inclinado) hasta el centro (horizontal) (Fig.10).

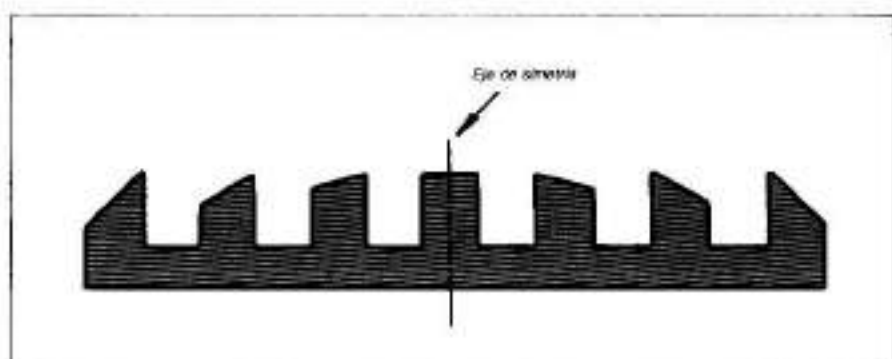


Fig. 10.- Corte de una lente de Fresnel (muy aumentada).

La luz, al atravesar las facetas, se refracta proporcionalmente a la inclinación de las mismas, con un ángulo elevado en las facetas exteriores y con ángulos nulos en el centro. El conjunto se comporta como una lente convergente con la ventaja de ser plana (las lentes normales son muy pesadas debido a que su espesor es variable).

Una vez diseñadas las facetas, pueden realizarse mediante un molde cantidades ilimitadas de lentes de Fresnel a precios muy reducidos.

Con lentes de Fresnel se han construido la mayoría de colectores solares de concentración fotovoltaicos.



SEMPER/SERON/88

FOTOPILAS BIFACIALES

Una fopopila normal sólo es activa por una cara. Si unimos dos fopopilas en oposición, con las rejillas hacia afuera, podemos tener una **fopopila bifacial**, que puede captar energía por las dos caras.

Ahora bien, dado el elevado precio de las fopopilas, utilizar dos fopopilas para hacer una fopopila bifacial no resulta muy económico. En lugar de esto, en el proceso de fabricación de la fopopila se introducen algunas modificaciones, las cuales dan lugar a la obtención de un disco de material del tipo p revestido en sus dos caras exteriores por material de tipo n (o al revés) (Fig.11).

De esta forma, se obtiene una fopopila bifacial, la cual si bien es más cara que una normal, puede captar el doble de energía.

Sin embargo, colocar una fopopila bifacial con una cara expuesta al Sol y la otra a la sombra no es excesivamente conveniente, puesto que la cara que está a la sombra produce poca energía. El sistema ideal es exponer al Sol ambas caras. Esto se logra mediante el uso de **espejos** (generalmente planos) convenientemente situados, de forma que la cara anterior reciba los rayos directamente del Sol y la posterior los reflejados por el espejo (Fig.12).

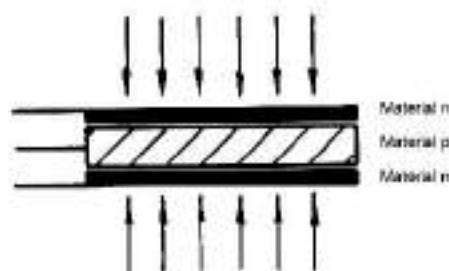


Fig. 11.- Utilización de una fopopila bifacial (capta energía por las dos caras).

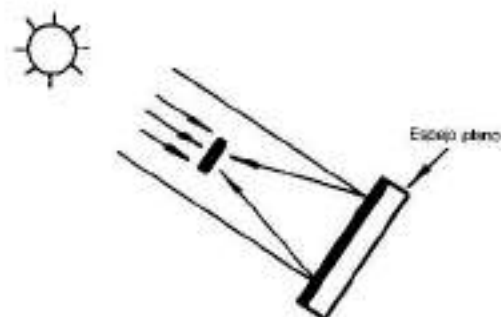


Fig. 12.- Modo de colocar una fopopila bifacial para que reciba los rayos del Sol por ambas caras.

Las fopopilas bifaciales pueden utilizarse también en **colectores de Winston**, los cuales, como se sabe, captan parte de la energía difusa y no precisan una focalización excesivamente correcta. En todos estos casos, las fopopilas bifaciales pueden proporcionar un rendimiento superior al 20% (referido a su propia superficie).

DATOS DE INTERES

TABLA DE CONVERSION DE LAS UNIDADES UTILIZADAS PARA MEDIR LA RADIACION SOLAR, EXPRESADA EN ENERGIA TERMICA POR UNIDAD DE SUPERFICIE

| | 1 Kwh/m ² | 1 Kcal/m ² | 1 BTU/SQFT | 1 Langley |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------|-----------|
| 1 Kwh/m ² | - | 860 | 317 | 86 |
| 1 Kcal/m ² | 0,00116 | - | 0,369 | 0,1 |
| 1 BTU/SQFT | 0,0032 | 2,71 | - | 0,27 |
| 1 cal/cm ² (Langley) | 0,0116 | 10 | 3,69 | - |

DATOS CARACTERISTICOS DE LOS MODULOS PHILIPS

| | BPX 47A | BPX 47B18 | BPX 47B20 | BPX 47C |
|------------------------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Diámetro de las células (mm) | 57 | 100 | 100 | 100 |
| Potencia máxima (W) | 11 | 16.5 | 18 | 33 |
| Tensión en el punto óptimo (volts) | 15.5 | 8.2 | 9.1 | 16.4 |
| Número de células por módulo | 34 | 18 | 20 | 36 |
| Dimensiones (mm x mm x mm) | 488x365x15 | 584x468x15 | 584x468x15 | 1055x428x47 |
| Peso (Kg) | 2,4 | 4 | 4 | 11 |

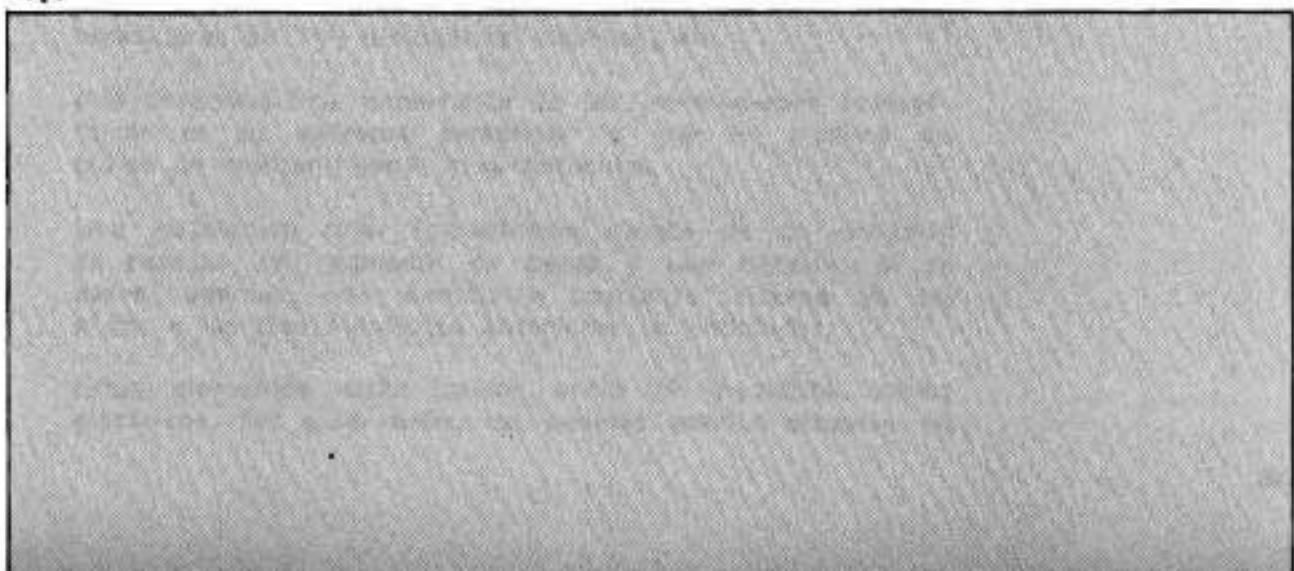


LISTA DE APLICACIONES NOTABLES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

| UBICACION | UTILIZACION | POTENCIA UTILIZAD. | POTENCIA MEDIA UTILIZABLE | POTENCIA SOLAR DISPON. | POTENCIA MAXIMA GENERADOR SOLAR | ACUMUL. CAPACIDAD Y TENSION | |
|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----|
| | | P (w) | P_m (w) | P_s (w/m ²) | P_p (w) | Ah | V |
| Desierto de Chile | Estación experimental | - | - | 168 | 87,5 | - | 3,3 |
| Arabia Saudita | Aerofaro | 12 | 6 | 240 | 38 | 400 | 12 |
| Francia e Inglaterra | Boyas marítimas | 12 | 6 | 130 | 90 | 600 | 12 |
| Francia e Inglaterra | Radiofaros | 50 | 20 | 150 | 195 | 200 | 24 |
| Francia e Inglaterra | Transmisores HF | 12 | 12 | 140 | 145 | 200 | 48 |
| América del sur | Repetidores TV | 11 | 11 | 220 | 18 | 200 | 24 |
| Nigeria | Televisión diédrica | 36 | 6 | 220 | 60 | 24 | 36 |



LECCION 30





30. INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS

INTRODUCCION

En esta lección se examinará con detalle cómo es una instalación solar fotovoltaica, así como las características de los elementos que la componen: el conjunto de paneles, el regulador de carga, las baterías y el convertidor u ondulator.

COMPONENTES DE UNA INSTALACION SOLAR FOTOVOLTAICA

Actualmente ya se comercializan paneles solares planos fotovoltaicos, aunque no sucede lo propio con los colectores de concentración fotovoltaicos, que todavía están en fase de desarrollo.

La utilidad de una instalación solar fotovoltaica es patente cuando se precisa disponer de energía eléctrica en lugares remotos a los que no llega y para los cuales sería muy costosa la instalación de una línea eléctrica. Tales casos pueden darse en viviendas aisladas, refugios de montaña, repetidores de TV, radiobalizas marinas, etc.

Una característica importante de las instalaciones fotovoltaicas es su **extrema sencillez**, lo que se traduce en costes de mantenimiento muy reducidos.

Una instalación solar fotovoltaica consta de un conjunto de paneles, un regulador de carga y una batería. Si se desea, además, que suministre corriente alterna se les añade a los tres elementos anteriores un ondulator.

Estos elementos están unidos entre sí mediante cables eléctricos. Por esta razón, los paneles pueden situarse en

lugares idóneos bastante alejados de la batería (Fig.1).

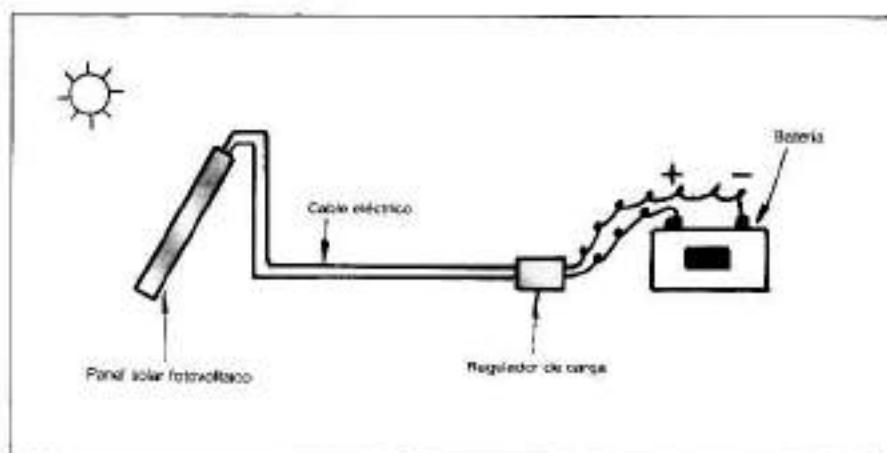


Fig. 1.- Elementos de una instalación solar fotovoltaica.

INCLINACION Y ORIENTACION DE LOS PANELES

Los paneles de fotopilas deben captar el máximo posible de energía solar, lo que significa que deben inclinarse y orientarse adecuadamente.

Estos paneles son fijos al igual que los planos, pero, dado su reducido peso y la flexibilidad del cable eléctrico, es habitual que puedan tomar distintas inclinaciones según la época del año.

Los paneles fotovoltaicos se apoyan en un soporte, el cual debe asegurar la solidez mecánica de los mismos.

Para usos que requieran poca potencia, se usa un número reducido de paneles, que suelen colocarse apaisados con el lado mayor horizontal. Estos paneles son de reducido peso y sus dimensiones no son tan grandes como las de los térmicos (las dimensiones exteriores usuales suelen ser de 1,25 m. de largo por 0,3 de ancho, aproximadamente).

Por esta razón, estos tipos de paneles (especialmente, cuando su número es reducido), no suelen colocarse en el suelo sino apoyados en las paredes o sobre el tejado. En esta decisión influye no solo el poco peso de los mismos sino también su elevado precio, factores que obligan a



protegerlos, especialmente colocándolos en lugares resguardados de posibles acciones vandálicas.

A veces, debido a esto, los soportes de los paneles son **basculantes**, pudiendo adoptar inclinaciones diferentes. El cambio de inclinación no presenta ninguna dificultad, considerando el reducido peso de los paneles y la flexibilidad del cable eléctrico de conexión.

La mayor o menor inclinación depende de la forma en que se consuma la energía eléctrica a lo largo del año.

Los consumos habituales de energía eléctrica están limitados exclusivamente a aquellas aplicaciones en que la energía eléctrica sea insustituible.

Así, no debe utilizarse una instalación solar fotovoltaica para calefacción ni para calentar agua, puesto que debido al poco rendimiento de las fotopilas y a su elevado precio, tal opción sería extremadamente cara, ya que exigiría disponer de gran número de paneles solares.

Las instalaciones solares fotovoltaicas se utilizan para alumbrado, radio, TV, bombas hidráulicas de pequeña potencia, pequeños electrodomésticos, etc. En general, para **consumos eléctricos de pequeña potencia**.

Por esta razón, el consumo de energía eléctrica es bastante uniforme a lo largo del año, especialmente si la nevera de la vivienda es eléctrica. En este caso, el incremento de consumo de alumbrado que se realiza en invierno se compensa por el mayor consumo de la nevera en verano.

Como consecuencia de ello, los colectores deben instalarse con un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar. De todas formas, siempre es posible poder variar la inclinación poniéndolos más inclinados en invierno y más horizontales en verano, mientras que en primavera y otoño adoptan una inclinación igual a la latitud.

Para consumos **uniformes** durante todo el año, puede ser recomendable aumentar de 5 a 15° el valor de la inclinación respecto a la latitud, a fin de que en verano capte un poco menos de energía (especialmente difusa). Esta compensación es necesaria por causa de la mayor duración del día en verano (recuérdese que este tipo de paneles captan la energía directa y difusa).

La orientación óptima es, naturalmente, la Sur y, como



en el caso de los paneles planos, variaciones de hasta 15° hacia el Este o hacia el Oeste tienen muy poca importancia.

REGULADOR DE CARGA

Los paneles solares fotovoltaicos cargan, como ya hemos dicho, una batería de la cual se extraerá la energía eléctrica necesaria.

Dependiendo de la insolación y del consumo eléctrico, la batería puede estar en proceso de carga cuando la transferencia de energía de los paneles a la batería es superior al consumo eléctrico. En caso contrario, la batería se descarga. También puede estar la batería en equilibrio cuando la energía aportada por los paneles es igual a la consumida, o cuando no hay aporte ni consumo.

Si la batería está completamente cargada y el aporte de los paneles es superior al consumo, puede producirse una **sobrecarga**, que es perjudicial para la vida útil de la batería.

Recordemos que la tensión que suministraban los paneles es superior a la de servicio de la batería.

Para una batería normal de plomo, esta tensión de carga es de unos 13,5 voltios. Si la batería no está totalmente cargada, estos 1,5 voltios de diferencia entre 13,5 voltios y 12 voltios (tensión nominal) son los que se encargan de vencer la **polarización** de la batería y realiza el proceso electroquímico que da lugar a la carga.

Cuando la batería está completamente cargada, esta diferencia de tensión no puede emplearse para seguir cargándola, y se utiliza para **descomponer** el líquido de la batería. En las baterías de plomo, el líquido es ácido sulfúrico diluido, y la descomposición del mismo es igual que la del agua, obteniéndose hidrógeno y oxígeno. Esta es la razón de que en las baterías de automóvil se ha de reponer periódicamente agua destilada para compensar la pérdida de la misma como resultado de la descomposición electro-lítica del electrolito.

Para evitar el posible peligro que puede suponer una sobrecarga de la batería, se instala un **regulador**, que es un elemento electrónico que cuando advierte que la batería

ya se ha cargado al máximo, impide que siga el proceso de aportación de energía eléctrica a la misma.

El estado de carga completa de la batería se pone de manifiesto cuando la intensidad absorbida por la batería disminuye y la tensión de la misma aumenta por encima de un cierto valor.

Los reguladores de carga pueden conectarse entre los paneles y la batería bien en serie o bien en paralelo.

Un regulador **en serie** suele consistir en un relé electromecánico que conecta o desconecta la conexión eléctrica entre los paneles y la batería. Cuando la batería ya ha alcanzado su máxima carga, abre el circuito eléctrico desconectando los paneles de la batería.

Modernamente, existen equipos electrónicos que realizan esta operación sin necesidad de relés electromecánicos (Fig. 2).

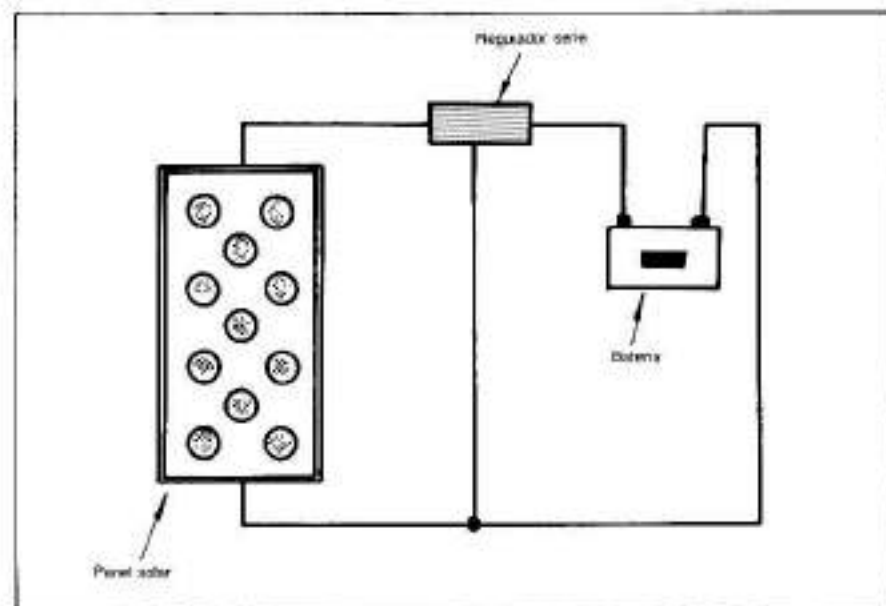


Fig. 2.—Regulación de la carga en serie.

Este tipo de regulador de carga en serie se emplea en instalaciones fotovoltaicas de cierta potencia.

La regulación de carga en paralelo consiste en **disipar** la energía sobrante en el propio regulador o en resistencias eléctricas externas. Este sistema suele emplearse para equipos pequeños, y, cuando funciona, el regulador se calienta a fin de disipar el calor (en los casos en que la

disipación de la energía eléctrica se realice en el propio regulador).

Mientras la batería se carga, el regulador en paralelo no tiene ningún efecto. Una vez cargada la batería, el regulador entra en acción y absorbe la energía eléctrica que de otro modo iría a parar a la batería (Fig. 3).

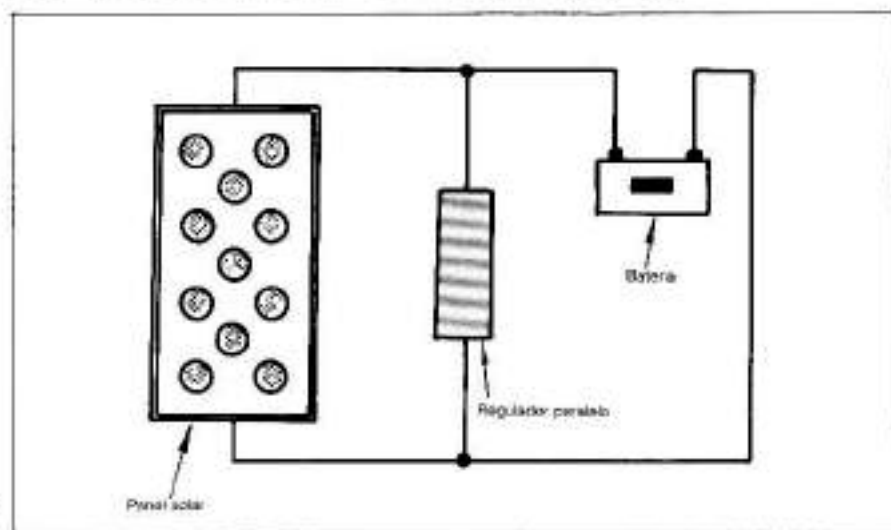


Fig. 3.-Regulación de la carga en paralelo.

Obsérvese que en el caso del regulador en **serie**, las fotorpilas quedan **desconectadas** y, por lo tanto, su rendimiento es nulo, lo cual hace que se **calienten más** por efecto de la radiación solar que en el caso de existir un regulador en **paralelo**, en el que las fotorpilas **producen electricidad**, y el 15% de rendimiento de las mismas no se emplea en calentarlas.

BATERIAS

La **batería** es el elemento donde se almacena la energía eléctrica para su posterior uso.

Las baterías utilizadas en instalaciones fotovoltaicas tienen algunas diferencias respecto a las baterías usadas en vehículos y, por esta razón, los principales fabricantes de baterías comercializan **modelos especiales para energía solar**. Estas diferencias se concretan en que:

- Son **estacionarias**, no estando sometidas a movimientos, vibraciones, etc. Esto hace que su vida útil sea mayor que la de las baterías instaladas en vehículos.

- Tienen una **carga suave** y una **descarga moderada**, mientras que las utilizadas en automoción tienen cargas moderadas y descargas fuertes de corta duración (arranque del motor).
- Tienen **mayor capacidad de almacenamiento** que las utilizadas en automoción.
- Han de tener una **autodescarga** interna muy reducida.

El hecho de que estas baterías sean estacionarias y, por lo tanto, fijas, hace que su construcción sea más sencilla y su vida útil más larga, puesto que las baterías utilizadas en vehículos se deterioran mucho como consecuencia de que las vibraciones del motor y las provocadas por la marcha sobre terrenos irregulares arrancan trozos de óxido de plomo de las placas.

Los consumos, como hemos dicho anteriormente, no suelen ser muy elevados y, por esta razón, el régimen de descarga de la batería es moderado, lo que favorece un aumento de su vida útil.

La mayor capacidad de la batería está en relación a los posibles días nublados (en que la captación de energía solar es menor), y se ha de hacer frente a un consumo igual.

La **autodescarga** es un proceso de pérdida de energía interna de la propia batería y es **inevitable** como consecuencia de la conductividad del electrolito. Del mismo modo que una pila de linterna nueva, dejada mucho tiempo sin usar, acaba descargándose, una batería también sufre una autodescarga interna (Fig.4).

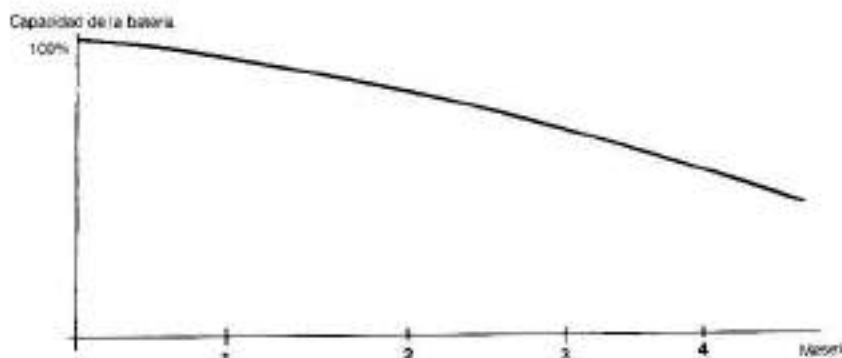


Fig. 4. Curva de autodescarga de una batería

Los posibles tipos de baterías a utilizar en aplicaciones de energía solar, son las siguientes:



- Plomo.
- Plomo-calcio.
- Níquel-cadmio.

Las baterías de **plomo** son similares a las usadas habitualmente en vehículos. Deben escogerse de **bajo mantenimiento** y debe conocerse cuál es el valor de la autodescarga, pues algunos tipos presentan una autodescarga excesiva que los hace incompatibles con las aplicaciones solares.

Las baterías de **plomo-calcio** son baterías **selladas** y, por ello, no precisan mantenimiento de ningún tipo (reposición de agua destilada). Presentan, respecto a la del plomo, una autodescarga mucho menor.

Las baterías de **cadmio-níquel**, son también selladas, no precisan mantenimiento, tienen autodescargas muy reducidas y soportan corrientes fuertes de descarga. Tienen el inconveniente de que son más caras.

En general, el tipo de baterías más usado es el de plomo-calcio, reservándose las de cadmio-níquel para aplicaciones de muy pequeña potencia o equipos especialmente compactos, tales como radiobalizas, pequeños repetidores de TV, etc.

Las baterías se caracterizan (aparte de su tensión nominal) por dos factores:

- Su capacidad de almacenamiento, que se expresa en amperios x hora.
- El porcentaje máximo de descarga aconsejable.

La **capacidad de almacenamiento** no es más que el producto de la intensidad de la corriente (a tensión constante) por el tiempo. Así, una batería de 100 A x h indica que puede proporcionar una corriente de 1 A durante 100 h.

Teóricamente, esta batería debería poder proporcionar cualquier pareja de valores de intensidad y tiempo tal que su producto vallera 100 A x h. Si a esta misma batería se la intentase hacer funcionar de forma que suministrase una intensidad de 100 A, con toda seguridad esta intensidad no duraría una hora, sino menos. Ello es debido a que la capacidad de las baterías depende del régimen de descarga, y a régimen de descarga fuerte (con grandes intensidades de corriente) la capacidad de la batería se reduce (Fig.5).

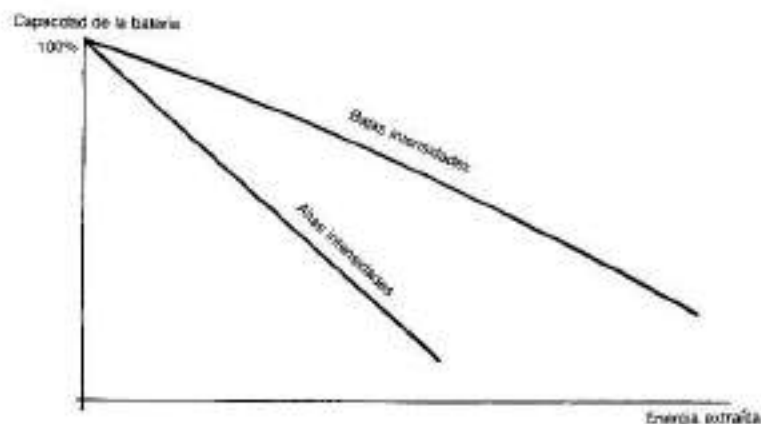


Fig. 5.—La capacidad de la batería depende de la intensidad extraída.

En consecuencia, el valor de la capacidad es orientativo, y debe tenerse en cuenta que es preferible que la batería se cargue y descargue con poca intensidad.

La capacidad de la batería está ligada al **volumen** de la misma. Una batería más grande tiene más capacidad que una pequeña y, por lo tanto, una batería grande podrá suministrar una mayor intensidad de corriente eléctrica que una pequeña.

Los fabricantes suelen indicar qué intensidad de corriente y de carga y descarga (suelen ser diferentes) son las más aconsejables para el tipo de batería en cuestión.

Esta capacidad se refiere a la **carga total** de la batería. En el ejemplo anterior, la batería de 100 A x h suministraba 1 A durante 100 h. Transcurridas las 100 h, se considera que la batería está totalmente descargada. En la realidad, a medida que el tiempo se aproxima a las 100 h, la intensidad empieza a disminuir y puede proseguir la descarga más allá de las 100 h, mientras que la tensión también disminuye.

La curva de descarga de una batería debería suministrar una tensión constante mientras se descarga hasta que la carga alcanza la capacidad de la batería, en cuyo momento la tensión cae a cero voltios.

En la realidad, dentro de un amplio intervalo de carga la tensión es prácticamente igual a la nominal, pero, a partir de un cierto punto, el voltaje empieza a disminuir

apreciablemente (Fig.6). Este punto indica el **porcentaje máximo de descarga aconsejable**.

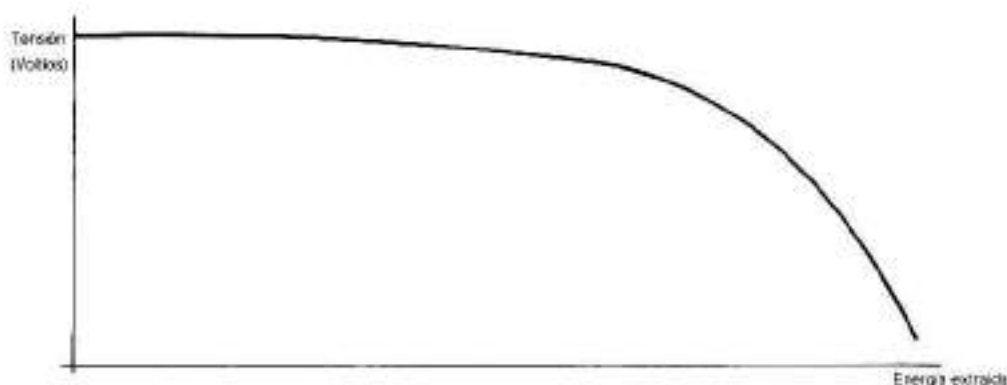


Fig. 6.- Curva que expresa la variación de la tensión de la batería en función de su descarga.

Si la batería se descarga por debajo de este porcentaje máximo de descarga, su vida útil se verá reducida en una medida proporcional al tiempo que permanezca descargada por debajo del porcentaje máximo de descarga y al valor en que se sobrepase este porcentaje máximo de descarga.

Naturalmente, el hecho de que alguna vez, esporádicamente, se sobrepase este porcentaje máximo de descarga no tiene demasiada importancia, pero si esto es habitual, la vida útil de la batería se reducirá de forma considerable.

Por lo tanto, cualquier batería debe conservarse siempre procurando que esté **cargada al máximo**. Lo dicho vale tanto para baterías de instalaciones solares como para las de automóviles y calculadoras de bolsillo.

Conocida la capacidad de la batería, podemos evaluar la energía que se pierde en su autodescarga. Si, por ejemplo, la autodescarga de una batería de 100 A x h es del 2% mensual, ello quiere decir que en un mes se han perdido 2 A x h. Si el voltaje de la batería es de 12 voltios, la energía perdida es de:

$$E = 2 \text{ A x h / mes} \times 3600 \text{ s / h} \times 12 \text{ v} = 86.400 \text{ J / mes}$$

Si el porcentaje máximo de descarga es del 25%, quiere ello decir que de los 100 A x h sólo podemos disponer de 25 A x h de forma efectiva.

Utilizando como unidad de energía el Kwh (1 Kwh = 3.6 E6 J), en este caso tendríamos que estos 25 A x h a 12



voltios son equivalentes:

$$P = 25 A \times h \times 12 v = 300 w \times h = 0.3 Kwh$$

NOTA: La batería se puede seguir descargando hasta el 100%, dando en este caso unos 1.2 Kwh, pero ya hemos visto que ello no es aconsejable.

Las baterías suelen exigir algunos cuidados. En las baterías de plomo debe verificarse periódicamente el nivel de electrolito, reponiendo con agua destilada la cantidad que se haya gastado (nunca se debe reponer con ácido sulfúrico, puesto que este ácido no se descompone).

En todas las baterías deben mantenerse limpios los bornes de conexión eléctrica, y es importante que estén a una temperatura adecuada.

En las baterías de plomo (tanto las normales como las de plomo-calcio), la **densidad** del electrolito varía con el grado de carga. Cuando están cargadas, el electrolito está más concentrado en ácido sulfúrico que cuando están descargadas.

Este fenómeno afecta a la **temperatura de congelación** del electrolito. Una batería descargada puede congelarse, pues el electrolito es agua con muy poco ácido. La congelación del electrolito de una batería supone generalmente el fin de la misma, debido al aumento de volumen del agua. Sin embargo, las temperaturas de congelación para baterías de plomo descargadas suelen ser de $-10^{\circ} C$, por lo que sólo habrá que tomar precauciones en climas muy fríos. Para estados de carga más elevados, las temperaturas de congelación son aún menores.

INSTALACION EN SERIE Y EN PARALELO

Los paneles solares se suelen fabricar para 12 y 24 voltios y se pueden unir eléctricamente entre ellos, en serie o en paralelo.

La disposición en **serie** permite **aumentar el voltaje** manteniendo **fija la intensidad**.

Por el contrario, la disposición en **paralelo** **aumenta la**

intensidad, manteniendo fijo el voltaje.(Fig.7).

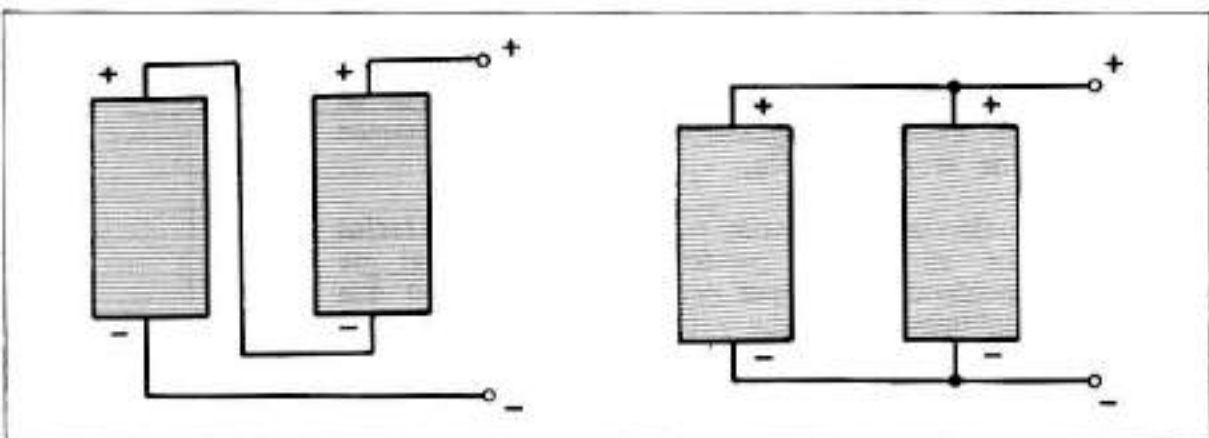


Fig. 7.—Disposición de los paneles en serie (izquierda) y en paralelo derecha.

Así, por ejemplo, tres paneles de 12 voltios y 2 amperios nominales podrían unirse en serie suministrando, en este caso, 36 voltios y 2 amperios; o en paralelo, en cuyo caso suministrarían 12 voltios y 6 amperios. Como se observa, la potencia total, tanto en un caso como en el otro, permanece constante y es de 72 W.

Las baterías, asimismo, pueden unirse en serie y en paralelo, teniendo las mismas propiedades: la colocación en serie hace que se sumen las tensiones, mientras permanece constante la intensidad, y la disposición en paralelo hace que se sumen las intensidades, permaneciendo constante la tensión.

Para bajo voltaje (menor de 50 V), las tensiones normalizadas son las de 12, 24, 36 y 48 V, que se obtienen por agrupación de 1, 2, 3 ó 4 elementos de 12 V. Para estas tensiones existen toda una serie de aparatos eléctricos comercializados, desde bombillas con rosca Edison, idénticas a las normales de 220 V, hasta televisores, equipos de alta fidelidad, fluorescentes, etc. etc.

Los paneles pueden, por lo tanto, instalarse como se quiera: en serie, en paralelo, o en combinaciones mixtas serie-paralelo.

Dado que los paneles proporcionan corriente continua, debe tenerse en cuenta la **polaridad** de la corriente suministrada, uniendo correctamente, en el caso de disposiciones en serie, el terminal positivo de un panel con el negativo del siguiente. Si el montaje es en paralelo, se unirán todos los positivos por un lado y todos los negativos por otro.



Las baterías, en caso de haber más de una, también pueden unirse. Así, por ejemplo, una instalación de 24 voltios podría estar formada por 6 paneles de 12 voltios unidos dos a dos en serie, y cada conjunto de estos dos paneles estando entre sí unidos en paralelo. La batería podría estar compuesta por dos baterías de 12 voltios unidas en serie.

CONVERTIDOR CONTINUA - ALTERNA

Para muchas aplicaciones se precisa disponer de corriente alterna a 220 V y 50 Hz, que es la usual en Europa.

Esta corriente alterna se puede conseguir fácilmente a partir de corriente continua mediante un convertidor de corriente continua a alterna (ondulador).

Un convertidor de este tipo es un aparato **estático** provisto de un **oscilador electrónico** (alimentado por la corriente continua de la batería), que envía pulsos de corriente continua a razón de la frecuencia de trabajo (50 por segundo) a un transformador eléctrico.

El transformador responde a cada pulso de corriente, dando lugar a la producción de un pulso de corriente de 220 V (si se conecta sin más a un transformador, una corriente continua solo produce un pulso de corriente en el momento de conectar y de desconectar; para que un transformador funcione, la corriente debe ser alterna o pulsatoria).

La corriente alterna de 220 V y 50 Hz obtenida suele consistir en una onda más o menos **rectangular**, que no es muy conveniente para ciertas aplicaciones. Por ello, se la somete a un nuevo transformador de relación de transformación 1 a 1, y con núcleo de material magnético no saturable, con lo cual se obtiene una corriente alterna prácticamente senoidal. A veces, también se hace necesario el uso de condensadores y reactancias inductivas, que se usan como filtros para obtener una perfecta forma de la corriente eléctrica (Fig. 8).

Si la carga alimentada con corriente alterna es de tipo inductivo o capacitivo (motores eléctricos, relés, transformadores, condensadores, etc.), se ha de tener en cuenta

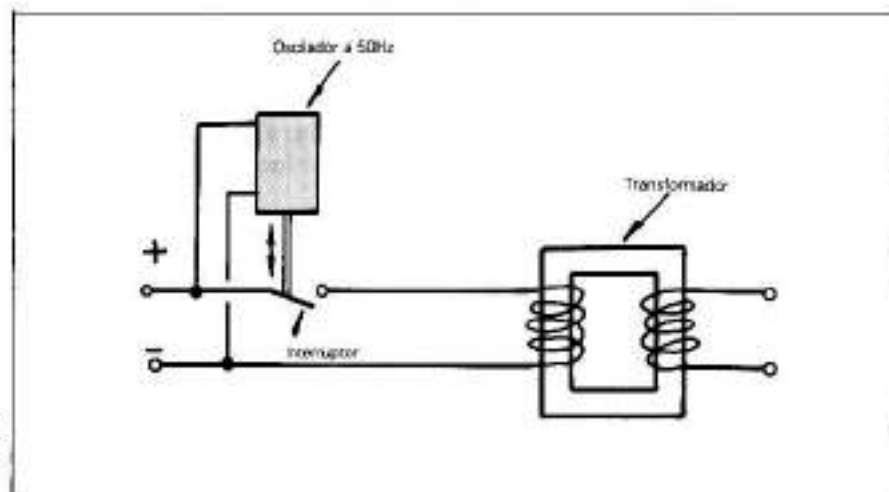


Fig. 8.- Esquema de un convertidor de corriente a alterna. El interruptor es, en realidad, electrónico y no mecánico.

el valor del coseno del ángulo de desfase entre la intensidad y la tensión. La potencia, realmente absorbida, del convertidor de corriente en alterna vale:

$$S = \sqrt{(V \times I \cos \varphi)^2 + (V \times I \sin \varphi)^2}$$

S = potencia absorbida VA.
 V = tensión alterna (V).
 I = intensidad alterna (A).
 φ = ángulo de desfase.

Se recuerda que la **potencia activa** (medida en watos) en corriente alterna, es igual a:

$$P = V \times I \times \cos \varphi$$

de donde puede despejarse la intensidad efectiva de corriente alterna:

$$I = \frac{P}{V \times \cos \varphi}$$

Dado que en los aparatos de corriente alterna que presentan **bobinados** el $\cos \varphi$ es menor que 1, la intensidad absorbida es mayor que la que absorbería un aparato de corriente continua equivalente.

La presencia de **cargas inductivas** origina un **consumo energético innecesario** a la instalación solar, por lo que es conveniente corregir el $\cos \varphi$ mediante la colocación de **condensadores** colocados en paralelo con la carga inductiva.

Los condensadores de alterna deben elegirse de una tensión de servicio de al menos 400 V, y el valor de su capacidad



que hace que el $\cos \varphi$ sea igual a la unidad, se calcula fácilmente como: (Fig. 9)

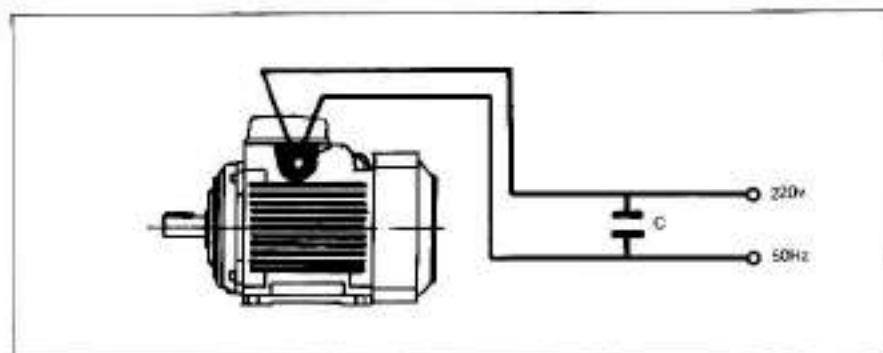


Fig. 9.- Es conveniente conectar condensadores en paralelo con las cargas inductivas (motores de corriente alterna, etc.) para mejorar el factor de potencia.

$$C = \frac{P \tan \varphi}{V^2 \times \pi \times f}$$

C = capacidad del condensador en Faradios (unidad de capacidad eléctrica).

φ = ángulo de desfase.

V = tensión alterna.

f = frecuencia de la corriente alterna (generalmente $f = 50$ Hz)

Ejemplo:

El convertidor de una instalación solar alimenta un motor de corriente alterna de 220 V, 200 W de potencia y un $\cos \varphi = 0,7$. Hallar la intensidad absorbida del convertidor, la capacidad del condensador necesario para corregir el $\cos \varphi$ y la nueva intensidad absorbida con el condensador conectado en paralelo con la carga.

La intensidad que circula por el cable eléctrico que alimenta el motor (medible con un amperímetro) vale:

$$I = \frac{200 \text{ w}}{220 \text{ v} \times 0,7} = 1,30 \text{ A}$$

El convertidor, por lo tanto, proporciona una potencia de servicio de:

$$S = V \times I = S = 220 \text{ v} \times 1,30 \text{ A} = 286 \text{ VA (Voltiamperios)}$$

Como se observa, el motor proporciona 200 W de potencia real, mientras que el convertidor necesita producir 286 VA. Los 86 VA restantes son consecuencia del ángulo de desfase φ . Si el convertidor sólo proporcionase 200 VA, al conectar este motor, el convertidor correría el riesgo de



quemarse debido a que estaría sobrecargado.

Hallemos ahora la capacidad del condensador que una vez ha sido conectado en paralelo con la carga, nos hace que el $\cos \varphi$ pase de 0.7 a 1.

El ángulo φ vale:

$$\varphi = \cos^{-1} 0.7 = 45.57^\circ$$

La capacidad del condensador será de: (para $f = 50$ Hz)

$$C = \frac{200w \times \tan(45.57^\circ)}{(200 V)^2 \times 2 \times \pi \times 50 \text{ Hz}} = 13.4 \mu\text{F}$$

Veamos ahora, la nueva intensidad que proporciona el convertidor ($\cos \varphi = 1$)

$$I = \frac{200 \text{ W}}{220 \text{ V} \times 1} = 0.91 \text{ A}$$

Y la potencia de servicio es de:

$$P = 220 \times 0.91 \times 1 = 200 \text{ VA}$$

Con la incorporación del condensador, la intensidad de corriente alterna ha pasado de 1.30 A a 0.91 A y la potencia de servicio del convertidor se ha reducido de 286 VA a 200 VA, lo que representa una notable economía.

Los convertidores **nunca** tienen un rendimiento del 100%. La intensidad que absorben de la batería se calcula como:

$$IDC = \frac{VAC IAC}{VDC \eta}$$

IDC = intensidad en corriente continua.
 VAC = tensión en corriente alterna.
 IAC = intensidad en corriente alterna.
 η = rendimiento del convertidor.

Así, si en el caso anterior la batería fuese de 24 V y el rendimiento del convertidor del 85%, el motor consumiría de la batería (a través del convertidor), cada hora:

$$IDC = \frac{220 \times 1.30 \text{ A} \times 1h}{24V \times 0.85} = 14.02 \text{ A} \times h$$



y en el caso de tener el condensador:

$$IDC = \frac{220V \times 0.91 \times 1h}{24V \times 0.85} = 9.81 A \times h$$

de donde se pone de manifiesto la conveniencia de mejorar el $\cos \varphi$ a 1.

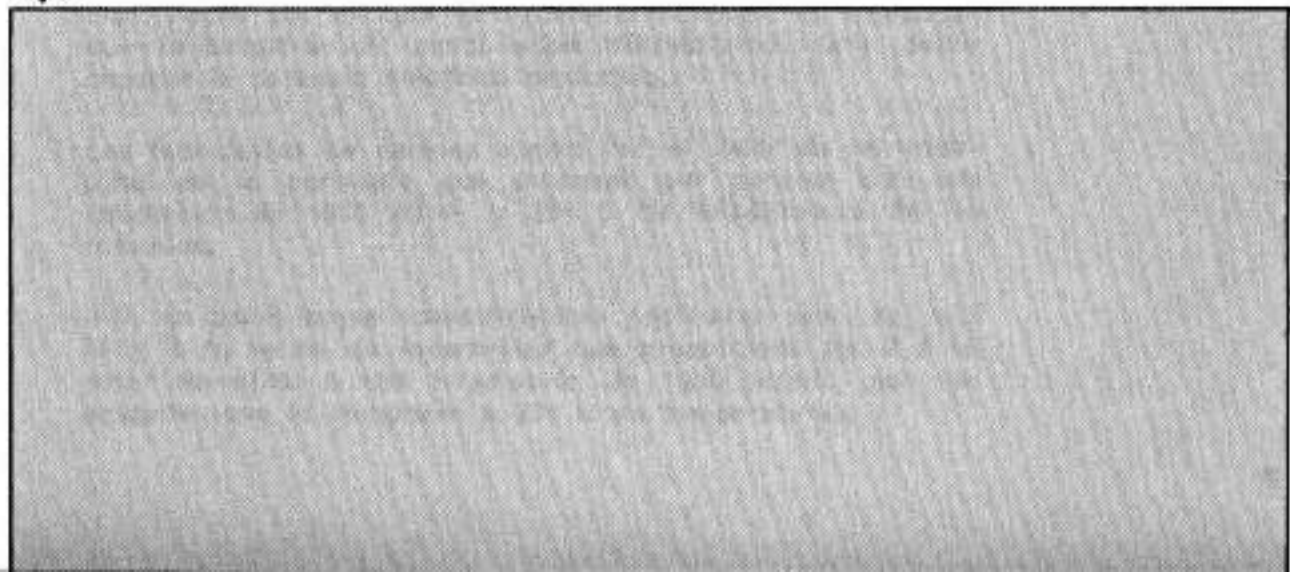
SISTEMAS DE PROTECCION

Una instalación fotovoltaica debe estar **protegida** al igual que cualquier instalación eléctrica mediante interruptores automáticos magneto-térmicos y fusibles.

La **sección** de los cables eléctricos debe estar en consonancia con la intensidad de corriente que por ellos ha de circular. Debido a que a igualdad de potencia, la intensidad aumenta si la tensión es menor, los cables de corriente continua a baja tensión deberán ser más gruesos que los equivalentes en corriente alterna.

Es conveniente disponer de un **pequeño cuadro de control**, donde estén presentes un interruptor general, un voltímetro y un amperímetro, así como los correspondientes fusibles e interruptores automáticos, comprobando periódicamente su correcto funcionamiento.

LECCION 31



31. CALCULO DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA

INTRODUCCION

Examinados ya los componentes constitutivos de una instalación solar fotovoltaica, llega ahora el turno, como ya se ha hecho en casos anteriores con otras instalaciones, de proceder al cálculo de la dimensión de una de estas instalaciones solares.

CARACTERISTICAS DE SALIDA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

Los paneles fotovoltaicos se caracterizan por dar al ser iluminados unos valores de **tensión** e **intensidad** de corriente eléctrica, medibles a la salida de aquéllos.

El valor de tensión, como ya sabemos, es prácticamente independiente del nivel de iluminación, si bien para iluminaciones muy bajas tiende a cero voltios.

La intensidad de la corriente varía con el nivel de iluminación, hecho por el cual es suficiente conocer la intensidad que proporciona un panel solar fotovoltaico para poder conocer la potencia eléctrica producida.

Los fabricantes de paneles suelen dar el valor de la intensidad de la corriente que producen sus paneles con una irradiación de 1000 W/m^2 y 25° C de temperatura de las fopilas.

Así, un panel cuyas características nominales sean de $13,5 \text{ V}$ y 2 A , se ha de interpretar que proporciona los 2 A al estar sometido a una irradiación de 1000 W/m^2 , con las fopilas que lo componen a 25° C de temperatura.

Si el valor de la irradiación es menor (por ejemplo 500 W/m^2), el panel suministrará la misma tensión (13.5 V) pero sólo la mitad de la intensidad (1 A).

Con estos valores de salida de los paneles solares, no hace falta realizar ningún tipo de cálculos acerca de la superficie ocupada por las fopopilas o la superficie total del panel, ni tampoco del rendimiento u otros parámetros que eran habituales en colectores solares térmicos. Esto es así debido al hecho de que la tensión permanece prácticamente constante para un amplio margen de niveles de irradiación.

VALOR DE LA RADIACION INCIDENTE

Para calcular la radiación que recibe un panel fotovoltaico, se busca el valor en la tabla de radiación correspondiente al lugar escogido y a la inclinación adecuada, obteniéndose así la radiación media diaria. Este valor expresa el promedio de la radiación sobre una superficie inclinada, en ese ángulo y orientada al sur.

Los criterios de inclinación ya han sido tratados en varias ocasiones a lo largo de este Curso. Si se desea disponer de varias inclinaciones a lo largo del año (por ejemplo, una por mes), se procede del siguiente modo:

En la tabla solar se busca, en la columna correspondiente a enero, el ángulo que proporciona el valor máximo de radiación y, dado que el ejemplo de cálculo de una instalación solar fotovoltaica se refiere a Valencia, vamos a utilizar la tabla de radiación correspondiente a Valencia, en la que observamos que en enero el máximo de radiación lo da una inclinación de 65° . A continuación, buscamos el valor máximo de febrero, que resulta ser de 55° , mientras que el máximo de marzo es de 40° , y así sucesivamente hasta diciembre.

Utilizando este procedimiento se obtiene la máxima cantidad de energía solar, si bien nos obligamos a disponer de inclinaciones diferentes (generalmente menos de 12, pues algunas de ellas coinciden), de forma que el día 1 de cada mes se varía la inclinación.

Este mismo procedimiento puede utilizarse en períodos de

tiempo mayores (cada tres meses, cada medio año, etc.), dando lugar a que el número de inclinaciones diferentes sea de 2 ó 3. Ya dijimos que debido al poco peso de los paneles solares fotovoltaicos y a la flexibilidad del cable eléctrico, es frecuente que los soportes de estos colectores sean **basculantes**, dotándose a los apoyos superiores de unas guías ranuradas a través de las cuales, mediante un tornillo, se puede fijar la inclinación de los paneles (Fig. 1).

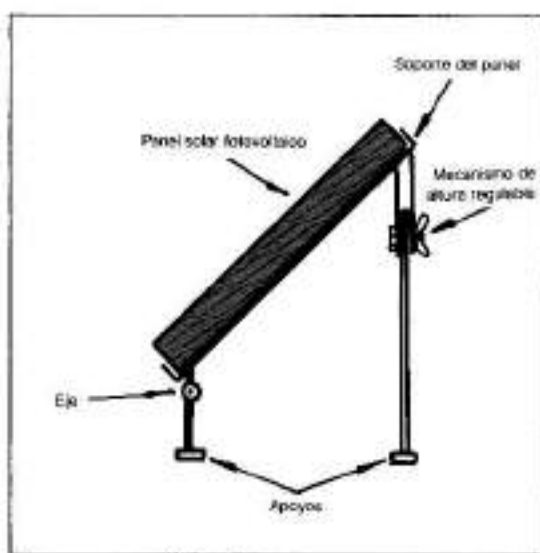


Fig. 1.— A veces, los paneles fotovoltaicos se instalan de forma que puede regularse su inclinación.

Si se desea una inclinación fija todo el año, pueden colocarse con una inclinación igual a la latitud más un número de grados comprendido entre 5 y 15.

Debido a la capacidad de almacenamiento de la batería, es conveniente realizar el cálculo con **base anual** para obtener finalmente un valor promedio de **radiación diaria anual** sobre el panel solar fotovoltaico (en instalaciones térmicas la duración del almacenamiento de calor raramente supera las 72 h, mientras que en aplicaciones fotovoltaicas, las baterías pueden almacenar la energía durante meses). Por esta razón se precisa un promedio diario anual.

El valor medio de la radiación diaria anual se calcula fácilmente del siguiente modo:

Se obtiene el valor de la radiación **media diaria mensual** correspondiente al mes de enero y a la inclinación elegida. Este valor se multiplica por los 31 días que tiene enero obteniéndose entonces el valor de la radiación durante el mes de enero.



El mismo procedimiento se realiza con los demás meses, multiplicando el valor obtenido de la tabla por los días que tiene cada mes. Finalmente, se suman todos los valores, con lo que obtendremos el valor de la radiación recibida en un año sobre 1 m² de panel.

Dividiendo este valor por 365 días, se halla el valor medio diario anual.

Como se observa, con este procedimiento se puede dar cualquier inclinación en cualquier mes, por lo que es de aplicación general.

Si la inclinación **es constante** a lo largo del año, no es necesario realizar las doce sumas, puesto que la tabla de radiación nos proporciona el total anual en la última columna (después de diciembre). En este caso, para obtener el valor de la radiación media diaria anual basta dividir el valor de la última columna (total anual) por 365 días para obtener el valor medio diario anual.

En el caso de Valencia, y de haber escogido como inclinación 45°, el valor total anual es de 6 307 940 KJ/m², lo que representa un promedio diario de: 17.282 MJ/m² diarios.

Este valor de radiación media diaria anual es la energía que en término medio recibe un m² de panel solar fotovoltaico. Podemos expresar este valor en Kwh, con lo cual tendremos el valor de la energía expresado en unidades eléctricas. Para ello, debemos dividir este valor (expresado en KJ) por 3600 (3600 segundos de una hora), obteniendo el número de Kwh de energía que recibe diariamente un m² de panel solar fotovoltaico.

Obsérvese ahora un hecho interesante: el producto de la potencia (Kw) por el tiempo (h) **es constante**, pero la potencia y el tiempo pueden adoptar diversos valores siempre y cuando su producto sea constante.

Así, en el ejemplo anterior, el número de Kwh era de:

$$\frac{17282 \text{ KJ/m}^2 \text{ día}}{3.6 \text{ E3s/h}} = 4.80 \text{ Kwh/día}$$

Estos 4,80 Kwh, pueden haberse suministrado mediante una irradiación de 1000 W/m² (= 1 Kw/m²) durante 4,80 h o con 500 W/m² durante 9,60 h. El resultado total habría sido el mismo.



Ahora bien: el panel solar fotovoltaico proporciona una **intensidad de corriente** eléctrica que es **proporcional** a la radiación. Los valores nominales de esta intensidad están calculados para un valor de irradiación de 1000 W/m^2 . En el primer caso (1000 W/m^2 de irradiación y 4.80 horas de exposición al Sol), el panel suministrará 2 A durante 4.80 h, lo que es igual a 9.60 A x h diarios. En el segundo caso (500 W/m^2 de irradiación y 9.60 h de exposición), el panel suministrará 1 A durante 9.60 h, lo que también es exactamente igual a 9.60 A x h diarios. Y esto es aplicable a cualquier tipo de paneles solares fotovoltaicos.

Así, en este ejemplo, si los paneles fotovoltaicos producen 2 A con 1000 W/m^2 de irradiación y 25° C de temperatura, durante un día producirán:

$$\frac{4.80 \text{ Kwh/m}^2 \text{ día} \times 2 \text{ A}}{1 \text{ Kw/m}^2} = 9.6 \text{ A} \times \text{h} \text{ diarios}$$

En consecuencia, para calcular la **aportación de un panel solar fotovoltaico**, basta multiplicar el valor de los Kwh de radiación solar que se reciben en un día por el número de amperios que proporciona el panel a 1000 W/m^2 . En todos estos cálculos, se supone que la temperatura de la fotopila no varía significativamente, de modo que la posible variación del rendimiento energético del panel es despreciable:

Aportación de un panel en $\text{A} \times \text{h} = \text{N}^\circ \text{ Kwh/m}^2 \text{ día}$ aportados por el Sol x Amperios nominales del panel.

CALCULO DE LA SUPERFICIE DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS NECESARIA

Así como en los sistemas térmicos el valor de la superficie de paneles necesaria era **indeterminado**, y su determinación se hacía en función de criterios económicos, en el caso de paneles fotovoltaicos, al **no existir energía auxiliar** posible, no se puede aplicar un criterio económico que reparta los costes entre lo ahorrado en energía convencional -debido al sistema solar- y lo gastado en energía convencional.

Debe tenerse en cuenta que el montar una instalación



solar fotovoltaica suele suponer que ésta es la **única fuente** disponible de energía eléctrica (casas aisladas, refugios de montaña, repetidores de TV, radiobalizas marinas, etc.). Sólo en algunos casos puede existir una aportación de energía eléctrica de origen **edólico**, obtenida en molinos de viento, pero, por ejemplo, utilizar un grupo electrógeno con motores diesel o de gasolina como apoyo del sistema solar fotovoltaico es totalmente descabellado.

Así, pues, la superficie necesaria de paneles solares será un valor **determinado**. Debido a que se utiliza el valor de la intensidad suministrada por el tiempo ($A \times h$), no se calcula propiamente la superficie sino ya directamente el **número de paneles solares** necesarios. El cálculo, como se verá, es notablemente más sencillo que en los sistemas térmicos.

Para obtener el número de paneles fotovoltaicos necesarios, debemos conocer los **consumos** de energía eléctrica que se producen. Estos consumos, los expresaremos en $A \times h$.

Para el cálculo del consumo en amperios hora, deberemos obtener la **potencia** de cada aparato (que figura obligatoriamente grabada en el mismo) y dividir por la tensión de servicio. Con ello, obtenemos el valor de la intensidad de corriente que circula por él.

A continuación, estimamos el tiempo en horas que permanece funcionando el aparato eléctrico. Multiplicando la intensidad por el tiempo, obtenemos la energía necesaria en $A \times h$ diarios.

Ejemplo: ¿Cuántos amperios-hora consume una bombilla de 60 W conectada a una red de 24 V, si permanece encendida 4 horas al día?

La intensidad vale: $I = \frac{W}{V} = \frac{60W}{24V} = 2.5 A$

Como que está encendida 4 h: $2.5 A \times 4 h = 10 A \times h$ diarios.

Para evaluar el consumo total se aplica este mismo procedimiento a las demás fuentes de consumo, sumándose todos los amperios hora de todos los aparatos que funcionen durante el día.

Si hay aparatos que sólo funcionan esporádicamente (por



ejemplo, una vez a la semana), se obtiene su valor de funcionamiento en amperios hora y se divide por el número de días que componen la semana o el período de tiempo entre funcionamiento y funcionamiento, añadiéndose este valor a la suma de consumos diarios.

De esta forma, se obtiene un valor del **consumo medio diario** en amperios hora.

Para que la instalación pueda funcionar eficientemente, los paneles solares deben suministrar, en promedio, la misma cantidad de amperios hora. Si los paneles suministran más energía que la que se consume, la batería se carga. Si suministran menos energía que la que se consume, la batería se descarga.

Debido al fenómeno de la **autodescarga** y a la **ineficiencia** del proceso de carga y descarga (que tiene un cierto rendimiento inferior al 100%), se ha de tomar un 20% más de energía aportada por los paneles solares, lo que repercutirá en un mayor número de paneles.

Con estos datos, ya podemos calcular el número de paneles necesarios como:

$$n = \frac{\text{Consumo diario en A x h}}{\text{Aportación de un panel en A x h x 0.8}}$$

El valor de la aportación de un panel en A x h, depende, como ya hemos dicho, del tipo de panel, de su superficie y de la insolación que reciba.

CALCULO DE LA CAPACIDAD DE LA BATERIA

La batería debe tener una capacidad de almacenamiento de energía eléctrica tal que permita cubrir las posibles insuficiencias de energía solar, descargándose pero sin **sobrepasar** el porcentaje máximo de descarga.

Dependiendo de la climatología local, se ha elaborado una tabla en la que se expresa el número de días que la batería debería poder suministrar energía eléctrica, aun cuando la captación de energía fuera prácticamente nula. Lógicamente,



este número de días de autonomía será mayor en zonas de lluvias frecuentes (el norte de España y Galicia), mientras que será menor en zonas soleadas.

Además, después de un período de poca insolación, la batería precisa un tiempo para recargarse, puesto que el valor de radiación media diaria anual es un valor medio. En un día despejado y soleado, la captación de energía es superior a este valor medio, pero este exceso se compensa en los días nublados.

El número de días de autonomía oscila en España entre 10 y 25. Si no se conoce, puede estimarse en 20 días.

En estas condiciones, la capacidad de la batería es de:

$$C = \frac{\text{Consumo diario } A \times h \times \text{Número de días de autonomía}}{\text{límite máximo de descarga tolerable}}$$

A este valor habría que sumarle la autodescarga, que se calcularía como el porcentaje de autodescarga mensual multiplicado por la capacidad de la batería supuesta sin autodescarga y por el número de días de autonomía, y dividido todo por los 30 días que tiene el mes. Si la autodescarga mensual es inferior al 5%, este valor a añadir a la capacidad de la batería es despreciable.

Ejemplo:

Calcular la capacidad de una batería para un consumo diario de 50 A x h en Valencia (número de días de autonomía: 15), si la autodescarga diaria es del 2% mensual. El límite máximo de descarga tolerable es del 25% (al llegar a este punto, la batería está cargada al 75% de su capacidad).

La capacidad de la batería sin autodescarga es de:

$$C = \frac{50 \text{ A} \times h \times 15 \text{ días}}{0.25} = 3.000 \text{ A} \times h.$$

El incremento de capacidad debido a la autodescarga es de:

$$C_a = \frac{0.02 \times 3000 \text{ A} \times h \times 15 \text{ días}}{30} = 30 \text{ A} \times h$$

Este valor representa el 1% de la capacidad de la batería, por lo que puede despreciarse. Se elegirá una batería (o



un conjunto de baterías) que proporcionen 3000 A x h.*

EJEMPLO DE APLICACION

Se ha de dotar de electricidad a un chalet situado en Valencia mediante paneles solares fotovoltaicos. Los consumos diarios previstos son los siguientes:

| | | |
|--------------------|------|-------|
| 1 comedor | 40 W | 3 h |
| 3 habitaciones | 20 W | 0,5 h |
| 1 Cocina | 20 W | 2 h |
| 1 Cuarto de baño | 20 W | 1 h |
| 1 TV de 220 V | 90 W | 2 h |
| 1 Bomba hidráulica | 60 W | 0,5 h |

El televisor tiene un $\cos \varphi = 0,9$ y el convertidor de corriente continua a alterna tiene un rendimiento del 85%. Los paneles solares fotovoltaicos proporcionan, con una irradiación de 1000 W/m^2 , una intensidad de 2,1 A y una tensión de 12 V. Se desea que la instalación de corriente continua sea de 24 V. Los paneles estarán a una inclinación fija todo el año.

Hallar el número de paneles necesarios y la capacidad de la batería en A x h (se supone despreciable la autodescarga) (Fig. 2).

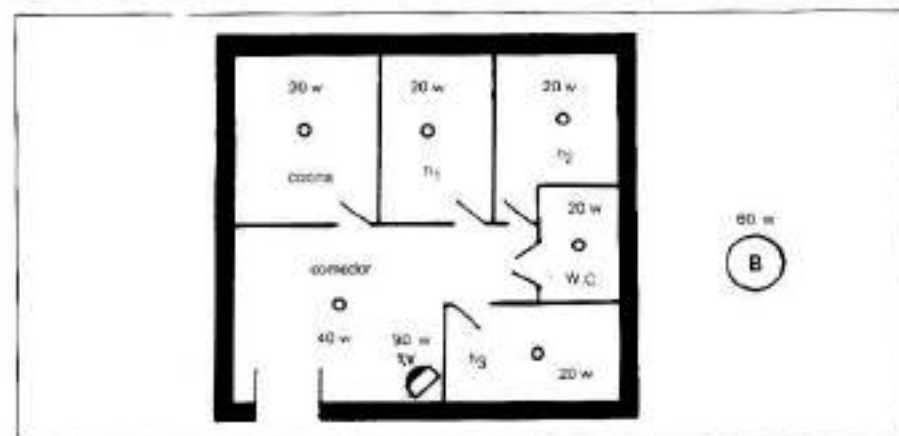


Fig. 2.- Plano de la casa a que se refiere el problema.

SOLUCION:

Elegimos una inclinación de 50° para los paneles. En estas condiciones, el total anual de la radiación solar que recibe

*No es aconsejable instalar baterías en paralelo a no ser que dispongan de interruptores entre ellas, de forma que siempre sea una batería la que proporcione la energía. La forma usual de aumentar la intensidad de salida es disponer de baterías de mayor capacidad.

una superficie de 1 m² es de: 6204032 KJ/m² año. El valor de 50° se ha elegido sobre el de 45° porque proporciona una mayor regularidad de valores de radiación a lo largo del año.

A continuación evaluamos los consumos. Para ello obtendremos la intensidad que absorbe cada elemento y la multiplicaremos por el número de horas que está funcionando. Construimos con esa finalidad la siguiente tabla en la que colocamos el lugar de uso, el número de elementos o consumos, la intensidad absorbida (dividiendo la potencia en vatios por la tensión -24 V-), el tiempo de funcionamiento y el producto del número de elementos por la intensidad y el tiempo (A x h):

| Lugar | n.º elementos | Potencia | Intensidad | Tiempo | A x h |
|--------------------|---------------|----------|------------|--------|-------------|
| Comedor | 1 | 40w | 1.66 A | 2 h | 3.32 |
| Sala de estar | 1 | 40w | 1.66 A | 3 h | 4.98 |
| Habitaciones | 3 | 20w | 0.83 A | 0.5 h | 1.25 |
| Cocina | 1 | 20w | 0.83 A | 2 h | 1.66 |
| Cuarto de baño | 1 | 20w | 0.83 A | 1 h | 0.83 |
| Alumbrado exterior | 1 | 10w | 0.42 A | 10 h | 4.20 |
| TV a 220v | 1 | 90w | 4.85 A | 2 h | 9.71 |
| Bomba hidráulica | 1 | 60w | 2.5 A | 0.5 h | 1.25 |
| TOTAL | | | | | 27.2 A x h. |

En el caso del televisor se ha hecho el supuesto de que no se le acopla ningún condensador de corrección del $\cos \varphi$. La intensidad de corriente alterna efectiva del televisor es:

$$IAC = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{90 \text{ w}}{220 \times 0.9} = 0.45 \text{ A}$$

Esta intensidad alterna absorbe de la batería a través del convertidor una intensidad de corriente continua de:

$$IDC = \frac{220v \times 0.45 \text{ A}}{24v \times 0.85} = 4.85 \text{ A}$$

Como el televisor está encendido 2 horas diarias, su consumo final es de:

$$4.85 \text{ A} \times 2 \text{ h} = 9.71 \text{ A} \times \text{h}$$

Sumamos ahora los amperios-hora diarios, que resultan ser 27.2 A x h. Evaluemos ahora la aportación de un panel solar. La aportación total anual solar es de 6204032 KJ/m² año. Dividendo este valor por 365 obtendremos el valor

medio anual:

$$\frac{6204032 \text{ KJ/m}^2 \text{ año}}{365 \text{ días/año}} = 16997.35 \text{ KJ/m}^2 \text{ día}$$

Pasamos este valor a Kwh, dividiendo por los 3600 s que tiene una hora:

$$\frac{16997.35 \text{ KJ/m}^2 \text{ día}}{3600 \text{ s/h}} = 4.72 \text{ Kw h/m}^2$$

Como que un panel suministra 2,1 A con una irradiación de 1 Kw/m², al recibir 4.72 Kw h/m² repartidos durante todo el día, el panel habrá producido:

$$\frac{4.72 \text{ kw h/m}^2 \text{ día} \times 2,1 \text{ A}}{1 \text{ Kw/m}^2} = 9.91 \text{ A} \times \text{h diarios}$$

por lo que el número de paneles solares necesarios será de:

$$n = \frac{27.2 \text{ A} \times \text{h diarios}}{9.91 \text{ A} \times \text{h diarios} \times 0.8} = 3.43 \text{ paneles.}$$

AÑO 3019, TRAS LA EXTINCIÓN DEL SOL Y EL AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS



Para mayor seguridad, redondeamos al número inmediato superior, que es de 4 paneles. Al ser este número par, nos permite colocarlos 2 a 2 en serie (son de 12 V), a fin de obtener los 24 V.

Así, pues, unimos en paralelo dos unidades formadas cada una por dos paneles en serie, con lo cual obtendremos los

24 V (en realidad, se obtiene una tensión algo mayor, que es la que facilita la carga de la batería).

Para calcular la capacidad de la batería, obtenemos el número de días de autonomía, que en este caso es de 15. Como el límite máximo de descarga tolerable es del 25%, la capacidad de la batería se calcula fácilmente como:

$$C = \frac{27.2 \text{ A} \times \text{h/día} \times 15 \text{ días autonomía}}{0.25} = 1632 \text{ A} \times \text{h.}$$

Escogeremos, por lo tanto, una batería de 24 V con una capacidad de 1632 A x h (o el valor más próximo a éste de los que existan en el mercado).

DATOS DE INTERES

A) DIAS DE AUTONOMIA DE LA BATERIA RECOMENDADOS PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

| | | | |
|-------------|----|------------|----|
| Alava | 25 | Lleida | 12 |
| Albacete | 12 | Logroño | 18 |
| Alicante | 10 | Lugo | 25 |
| Almería | 12 | Madrid | 10 |
| Avila | 14 | Málaga | 10 |
| Badajoz | 10 | Murcia | 10 |
| Baleares | 15 | Navarra | 20 |
| Barcelona | 15 | Orense | 25 |
| Burgos | 18 | Oviedo | 25 |
| Cáceres | 12 | Palencia | 15 |
| Cádiz | 10 | Pontevedra | 18 |
| Castellón | 14 | Salamanca | 15 |
| Ciudad Real | 14 | Santander | 25 |
| Córdoba | 10 | Segovia | 14 |
| Cuenca | 14 | Sevilla | 12 |
| Girona | 16 | Soria | 16 |
| Granada | 10 | Tarragona | 16 |
| Guadalajara | 14 | Tenerife | 10 |
| Guipúzcoa | 25 | Teruel | 16 |
| Huelva | 10 | Toledo | 10 |
| Huesca | 15 | Valencia | 15 |
| Jaen | 12 | Valladolid | 14 |
| La Coruña | 22 | Vizcaya | 25 |
| Las Palmas | 16 | Zamora | 15 |
| León | 16 | Zaragoza | 14 |

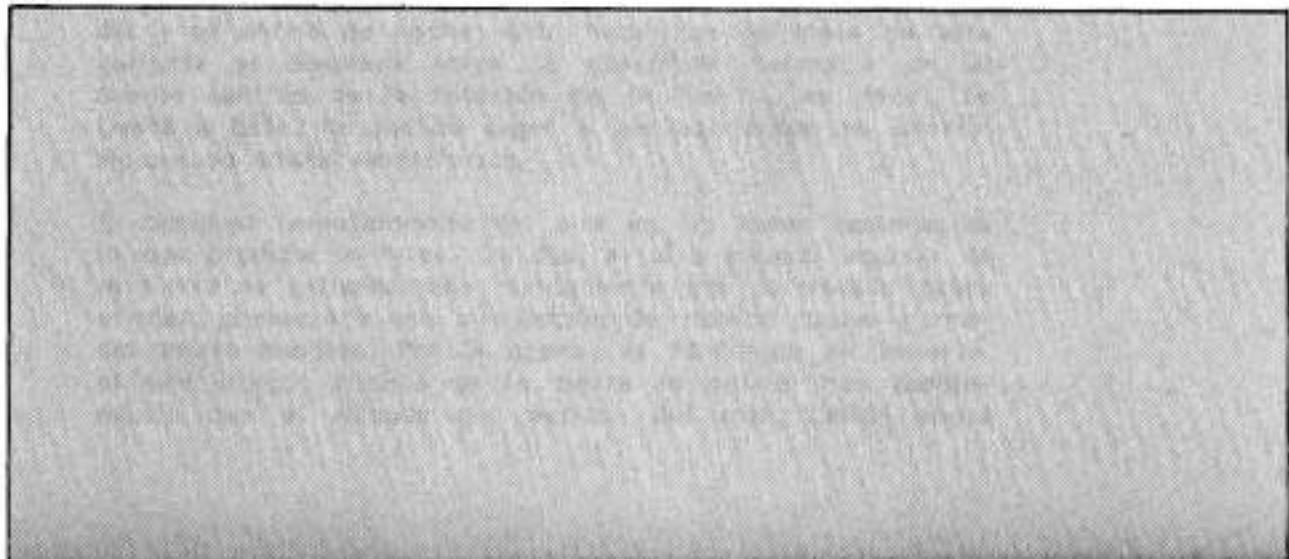
B) PROGRAMA PARA CALCULAR EL NUMERO NECESARIO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS Y LA CAPACIDAD DE LA BATERIA:

```

10 'CALCULO DEL NUMERO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS. (C) J.Ribot
11 dim MESES$(12)
12 dim DIAS(12)
13 for n = 1 to 12
14   read DIAS(n)
15 next
16 for n = 1 to 12
17   read MESES$(n)
18 next
19 CLS
20 input "CONSUMO MEDIO DIARIO EN kWh.: ", c
30 b = 0
40 print "LA INCLINACION DE LOS PANELES ES LA "
41 input "MISMA DURANTE TODO EL AÑO 1 = Si 2 = No : ", g
50 if g = 0 then goto 70
60 input "APORTACION TOTAL ANUAL? KJ/m2.: ",b:goto 140
70 for n = 1 to 12
80   gosub 250
81   input "APORTACION SOLAR DIARIA EN EL MES INDICADO KJ/m2.: ", a
82   a = DIAS(n) * a
120  b = b + a
130 next n
140 k = b / (365 * 3600)
150 cls
160 input "INTENSIDAD DE CORRIENTE QUE GENERA EL PANEL CON 1000 W/m2.: ", i
170 d = k * i
180 p = c / (d * 0.8)
190 input "NUMERO DE DIAS DE AUTONOMIA DE LA BATERIA: ", u
200 input "PORCENTAJE MAXIMO DE DESCARGA ACONSEJABLE %: ", a
210 e = c * u / (a * 0.01)
220 print "NUMERO DE PANELES: "; p
221 print
222 print "CAPACIDAD DE LA BATERIA: "; e; "Ah."
230 stop
240 run
250 cls
260 print MESES$(n)
270 return
280 '
6000 DATA 31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31
15000 DATA "ENERO", "FEBRERO", "MARZO", "
15005 DATA "ABRIL", "MAYO", "JUNIO", "
15010 DATA "JULIO", "AGOSTO", "SEPTIEMBRE", "
15020 DATA "OCTUBRE", "NOVIEMBRE", "DICIEMBRE", "

```

LECCION 32





32. LA ENERGIA DEL VIENTO

INTRODUCCION

La energía del viento (energía eólica) es otra forma de energía relacionada con la energía solar, y desde la crisis del petróleo de 1973 su uso está en progresivo auge. El interés de estudiar este tipo de energía en nuestro Curso es evidente, si tenemos en cuenta que la energía eólica tiene las mismas características de dispersión y no constancia de la energía solar.

CIRCULACIÓN DE VIENTOS EN LA TIERRA

El viento se origina como consecuencia del desigual calentamiento de las masas de aire sobre el planeta. Este desigual calentamiento tiene su causa en la acción del Sol.

En la Tierra, las zonas ecuatoriales están más calientes que las polares, lo que determina la existencia de un flujo de aire cálido del Ecuador hacia los polos, y un retorno de este aire frío por las capas altas de la atmósfera.

Debido a la rotación de la Tierra, el aire se calienta de día y se enfría de noche; esto hace que la masa de aire caliente se desplace sobre la superficie terrestre en el mismo sentido de la rotación de la Tierra, es decir, de Oeste a Este, lo que da lugar a las corrientes en chorro, típicas en ambos hemisferios.

El desigual calentamiento del aire en las zonas costeras es lo que produce la brisa. De día, el aire situado encima de la tierra se calienta más rápidamente que el situado sobre el mar, provocando una circulación de vientos suaves llamados brisas marinas. Por la noche, el fenómeno se invierte: el aire situado encima de la tierra se enfría más rápidamente que el situado por encima del mar, dando ahora



lugar a una circulación de viento de la tierra al mar.

Los vientos que soplan de forma fuerte suelen afectar a determinadas zonas costeras, puesto que los **obstáculos** (montañas) **les hacen perder fuerza** y les obligan a cambiar de dirección. También en ciertas zonas rodeadas de montañas, las cuales obligan a los vientos a circular en direcciones determinadas, se producen zonas con fuertes vientos, como sucede en la zona del estrecho de Gibraltar o en el valle del Ebro.

En general, la **velocidad de los vientos** aumenta a medida que **aumenta la altura**. A ras del suelo, la velocidad suele ser baja debido a que el viento encuentra numerosos obstáculos, tales como vegetación, árboles, edificios, etc. A medida que se va ganando altitud (en terreno llano o sobre el mar), los vientos soplan más fuertes.

Se ha obtenido una relación experimental entre las velocidades del viento y la altura, que vale:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^n$$

V = velocidad del viento (m/s).

H = altura (m).

El valor de n varía entre 0,14 para una zona marítima alejada de las costas y 0,34 para una zona terrestre interior y accidentada. Con esta expresión se puede estimar la velocidad del viento que existe a cierta altitud, conociendo la velocidad a otra altura. Recordemos que la velocidad del viento se mide con un **anemómetro**, y su dirección con una **veleta** (Fig.1).

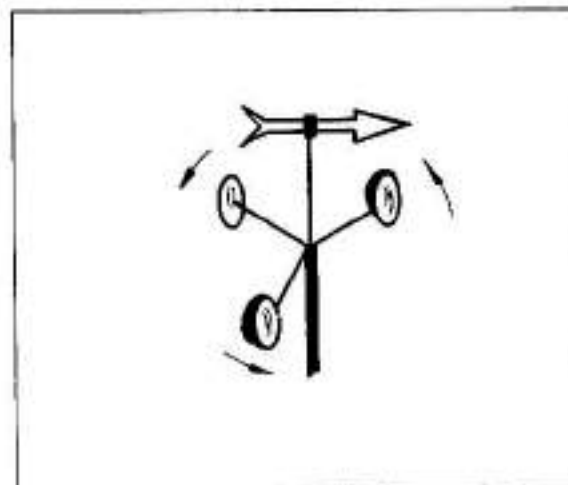


Fig.1.- Anemómetro y veleta para medir, respectivamente, la velocidad y la dirección del viento.

La fórmula anterior sólo es válida en los casos de **circulación uniforme** y no debe aplicarse más allá de unos cientos de metros, pues si se asciende mucho en altitud, los vientos suelen cambiar de dirección, siendo frecuente que en las capas inferiores circulen vientos en una dirección y en las superiores en otra.

PROPIEDADES DE LA ENERGIA EOLICA

La energía eólica posee una serie de propiedades, ya estudiadas en la lección 2. Es una energía renovable, no contaminante, dispersa y no constante. Estas características la hacen bastante parecida a la solar, hecho que se acusa por ser también gratuita y, en principio, disponible en cualquier lugar del planeta.

Como la energía solar, no todos los lugares del planeta son idóneos para su uso, pues hay zonas que tienen mejores características que otras. (Ver la figura 2 en la página siguiente).

La energía del viento es susceptible de aprovechamiento por unos aparatos llamados **aerogeneradores** (molinos de viento).

Los aerogeneradores consisten en aparatos provistos de **palas** dotadas de cierta curvatura, las cuales se ponen a girar al ser impulsadas por el viento (Fig. 3).

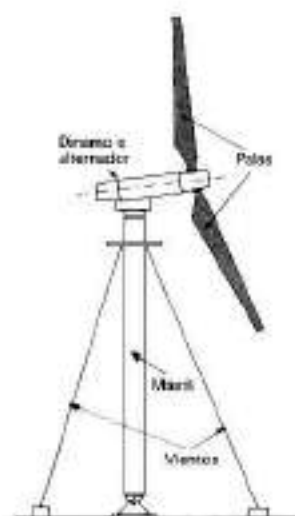
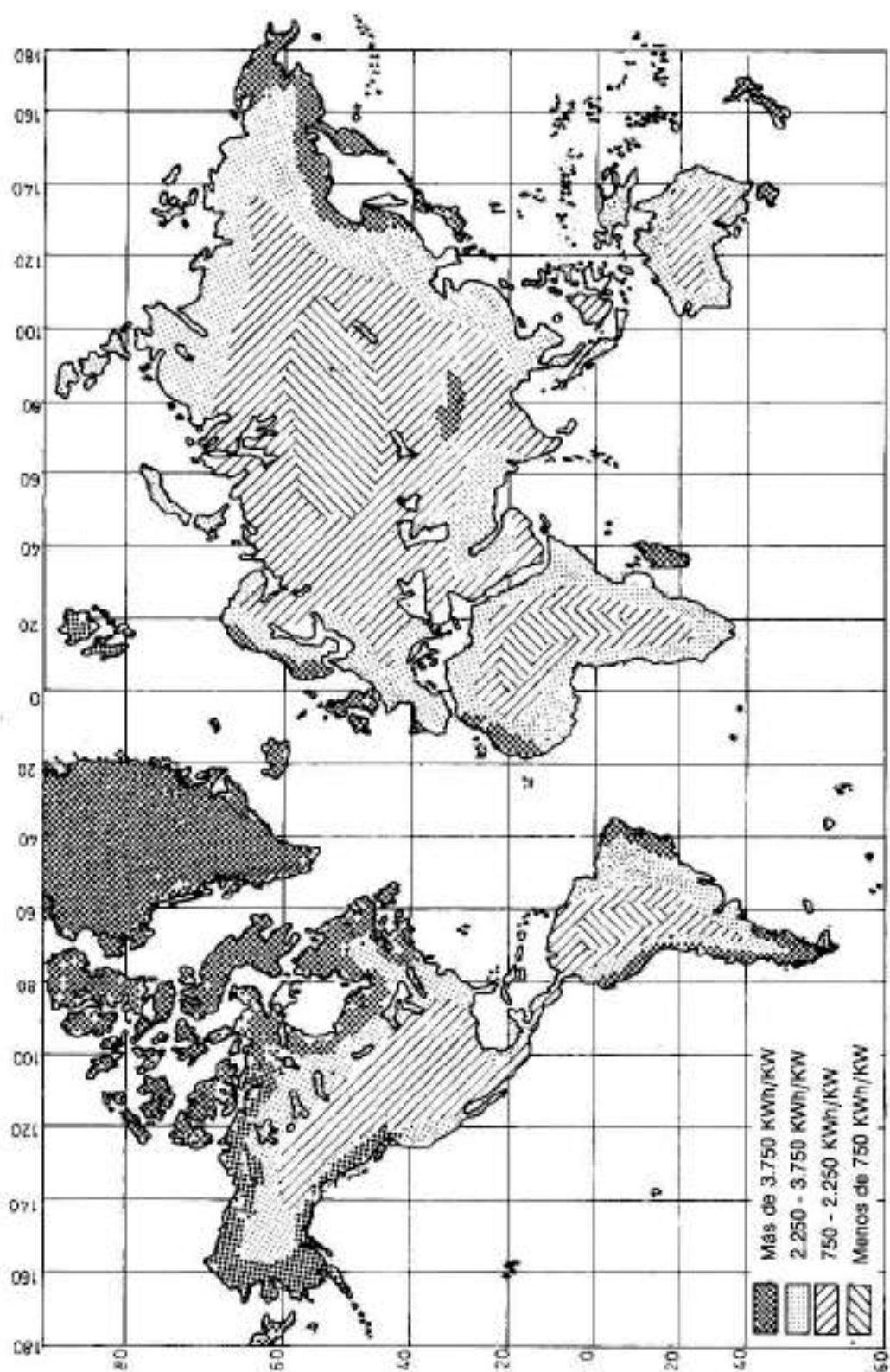


Fig. 3.- Aerogeneradores.



La potencia que puede suministrar una masa de aire a un aerogenerador es:

$$P = \frac{\rho A V^3}{2}$$

P = potencia en W.

ρ = densidad del aire (Kg/m³).

A = área abarcada por las palas (m²).

V = velocidad del viento m/s.

Como puede deducirse de la fórmula, la potencia aumenta con el **cubo** de la velocidad del viento. Una velocidad del viento doble proporciona una potencia ocho veces superior, lo que hace que un sistema eólico sea especialmente eficiente desde el punto de captación de energía.

El hecho de que la potencia entregada aumente con el cubo de la velocidad hace que la energía eólica sea **especialmente interesante** para utilizarla en aquellas zonas donde existe **mucho viento**, que, como ya hemos dicho, son, además de ciertas zonas costeras, amplios valles que tengan la misma dirección que los vientos dominantes, cimas de montañas, etc.

La energía eólica es uno de los tipos de energía **más limpios** en lo que se refiere al entorno natural, incluso más aún que la energía solar.

Otra de las ventajas de la energía eólica es que es una energía que se obtiene directamente en forma de **potencia mecánica** en un eje en rotación. Esta potencia mecánica puede fácilmente transformarse en energía eléctrica, con rendimientos globales muy superiores a los que proporciona un ciclo termodinámico.

El **rendimiento energético** de un aerogenerador **depende del tipo que se utilice**. Hay adaptadores apropiados para velocidades reducidas de viento y aerogeneradores que tienen mejores rendimientos para velocidades de viento elevadas.

TIPOS DE AEREOGENERADORES

Existen diversas clases de aerogeneradores, que en general, pueden clasificarse según la posición de su eje, en:

- De eje horizontal.

● De eje vertical.

Los sistemas de **eje horizontal** son los más utilizados. Consisten en un eje horizontal sobre el cual van montadas un determinado número de palas.

Según esto, los aerogeneradores pueden ser bipalas, tripalas, tetrapalas o multipalas, en función de que tengan 2, 3 o 4 o más palas. Cuanto menor es el número de palas, el aerogenerador puede girar a más velocidad (Fig. 4). La razón de esto es que una pala al batir el aire crea una **turbulencia** a su alrededor. Debido a la velocidad del viento, esta turbulencia es arrastrada fuera del aerogenerador.

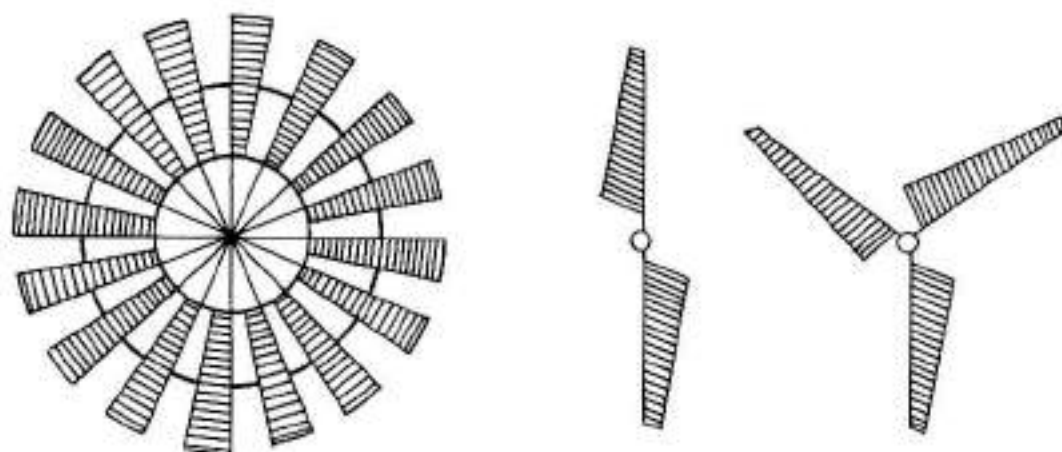


Fig. 4.- Aerogeneradores multipala, bipala y tripala.

Si consideramos una posición fija de la pala (la superior, por ejemplo), al girar el aerogenerador y pasar una pala por esta posición, crea una turbulencia. Para que el rendimiento sea máximo, la siguiente pala no debe encontrar turbulencia cuando ocupe la posición de la anterior. En un sistema multipala, las palas están muy próximas unas a otras. Por esta razón, la velocidad de rotación a la que se conseguirá el máximo rendimiento no puede ser muy elevada, pues el ángulo que separa una pala de la anterior es pequeño y hay que dar paso a que la propia velocidad del viento arrastre la turbulencia fuera del aerogenerador.

Por el contrario, un sistema bipala puede girar a gran velocidad, puesto que el ángulo que separa las dos palas es de 180° y, si consideramos que la turbulencia tarda en ser expulsada de las inmediaciones de las palas **el mismo tiempo** que en un sistema multipala, la velocidad de giro puede ser mucho mayor.

El **perfil** de una pala es muy complejo pues ha de tener en cuenta una serie de conceptos **aerodinámicos**, tales como el ángulo de incidencia y de calado, y la forma geométrica que ha de adoptar en relación con las fuerzas de sustentación (Fig.5).

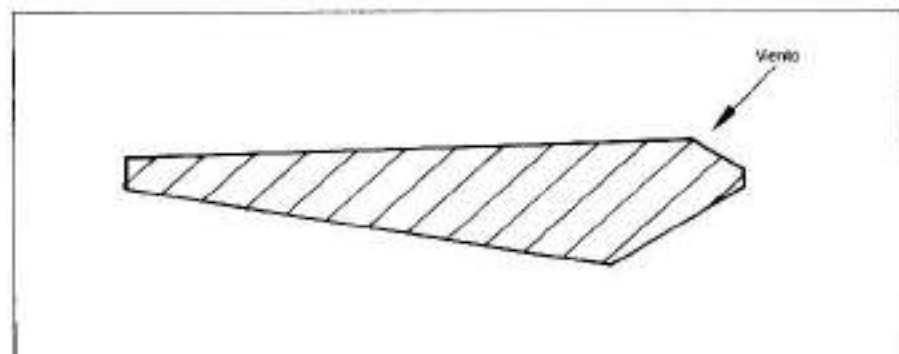


Fig. 5.- Perfil de una pala. Los perfiles aerodinámicos son redondeados en la zona de ataque y puntiagudos en la de escape.

Las palas, si son largas y están sometidas a velocidades de rotación importantes, deben soportar **esfuerzos mecánicos considerables** por efecto de las fuerzas centrífugas. Por ese motivo, las palas se hacen de materiales muy ligeros, como poliéster reforzado con fibra de vidrio, aleaciones de aluminio, etc.

En este tipo de aerogeneradores de eje horizontal, las palas pueden ser de **geometría variable**, dependiendo de la velocidad de rotación.

Mediante un mecanismo centrífugo, las palas pueden adoptar diversas posiciones según la velocidad. De esta manera se mejora el rendimiento global del aerogenerador, pues tiene buenos rendimientos para cualquier velocidad del viento.

Estos aerogeneradores de eje horizontal son los más frecuentes y están ampliamente comercializados.

El montaje de los mismos se realiza sobre una **torre metálica** similar a las utilizadas para líneas de alta tensión. En la parte superior se coloca el aerogenerador, que consiste en el eje de rotación, las palas y la veleta para que gire y se oriente en la dirección del viento.

La gran mayoría de aerogeneradores llevan, asimismo, en su parte superior la **dinamo** o el **alternador** para la producción de energía eléctrica.

La energía suministrada por el aerogenerador también puede transmitirse al suelo mediante un **eje de rotación**.

Para ello basta situar en la parte superior de la torre un engranaje cónico que transmita la fuerza con una dirección de 90° respecto a la producida en el aerogenerador. En determinados casos, puede ser preferible que la dinamo o el alternador estén situados en la parte inferior a nivel del suelo, debido a su excesivo peso, dificultad de mantenimiento a gran altura, etc.

La altura de los aerogeneradores aumenta a medida que aumenta su potencia y, con ello, el área barrida por las palas.

Para determinadas potencias, a veces puede ser preferible utilizar varios aerogeneradores más pequeños que uno solo de gran tamaño. Los aerogeneradores pequeños ofrecen un menor rendimiento por cuanto al estar a menor altura sobre el suelo, el aire circula a menor velocidad. Si se aumenta el tamaño de los aerogeneradores, puede (para tamaños no demasiado grandes) que sea preferible uno grande a dos o tres pequeños. Si el tamaño de aerogenerador aumenta aún más, los costes de instalación, posible mantenimiento a gran altura, seguridad del mismo, etc. hacen que sea preferible utilizar modelos más pequeños.

Hemos visto, hasta aquí, aerogeneradores de eje horizontal, los cuales en esencia son todos muy parecidos entre sí, diferenciándose fundamentalmente sólo por el número de palas.

Los aerogeneradores de **eje vertical** no precisan veleta para su orientación, pues el viento siempre incide perpendicular a los mismos. Son de dos tipos, fundamentalmente: el **rotor Savonius** y el **rotor Darrieus**. El primero es adecuado para vientos suaves, mientras que el rotor Darrieus es más apropiado para vientos de cierta intensidad.

El **rotor Savonius** (Fig.6) consiste en disponer verticalmente una superficie en forma de S con el centro de rotación en el punto central del arco de la S. Un ejemplo de rotor Savonius es el que antiguamente tenían las barberías junto a su puerta, y también ciertos anuncios giratorios colocados en las carreteras.

Debido a la velocidad del viento, el rotor Savonius gira (cada una de las dos semisuperficies de que está constituida la superficie del rotor puede considerarse como una pala) y produce una **intensa turbulencia**, lo que obliga a que su velocidad de rotación sea reducida.

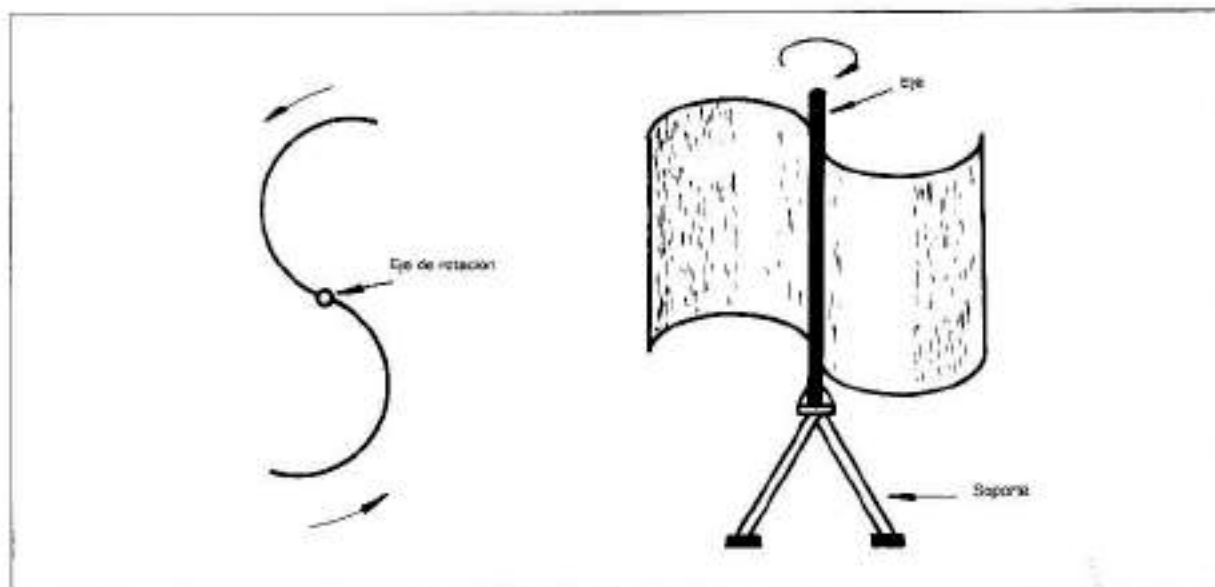


Fig. 6.- Rotor Savonius.

El rotor Darrieus (Fig.7) es un producto de nueva tecnología y consta de un eje vertical sobre el que hay dispuestas unas tiras (generalmente 3) que están apoyadas en la parte superior e inferior del eje vertical y que son más largas que éste. De esta forma, las tiras se separan del eje vertical alcanzando su máxima separación en la zona intermedia del eje vertical.

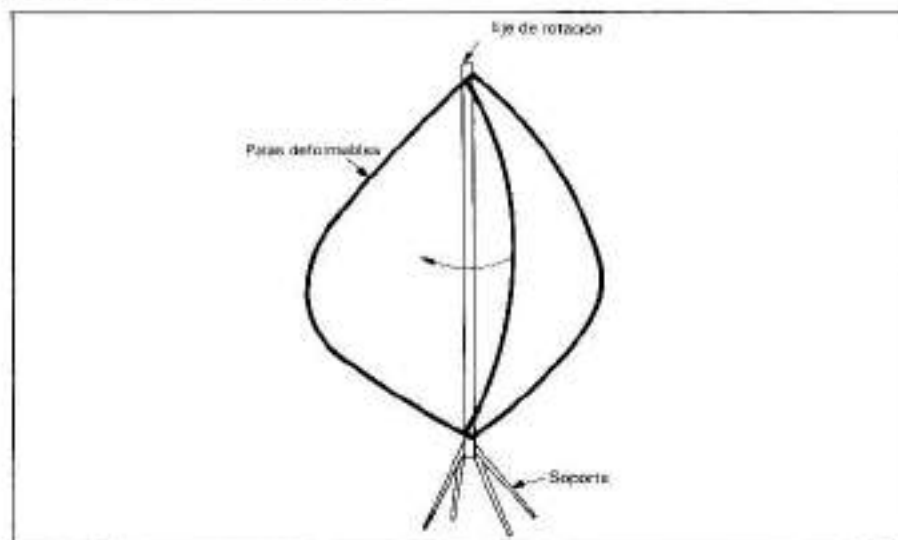


Fig. 7.- Rotor Darrieus.

Las tiras, que son de material elástico, están decaladas un cierto ángulo respecto a la perpendicular del eje de rotación (es decir, no miran al eje). Este ángulo de decalaje puede variarse mediante un dispositivo centrífugo, dependiendo de

la velocidad de rotación,

La forma de las tiras no es constante sino que, debido a la fuerza centrífuga, adoptan diversas posiciones separándose más del centro a velocidades altas.

Por causa de la poca superficie de las tiras, este aerogenerador crea **muy poca turbulencia**, circunstancia que lo hace apropiado para altas velocidades de giro. Además, tiene la ventaja de que el generador de electricidad (dinamo o alternador) que generalmente es muy pesado, puede situarse a nivel del suelo.

El rotor Darrieus es un aerogenerador que puede competir con los bipalas o tripalas de eje horizontal, pues tiene prestaciones equivalentes. No obstante, no está aún desarrollado comercialmente.

RENDIMIENTO DE UN AEROGENERADOR

Debido a la turbulencia creada por el giro de las palas en el seno de la corriente del viento, el rendimiento que puede alcanzar un aerogenerador queda bastante limitado, no superado en general el 50%.

Los rendimientos suelen expresarse en una gráfica en la que figura, por una parte, el rendimiento y, por otra, el cociente entre la velocidad lineal de la punta de las palas y la velocidad del viento (Fig.8).

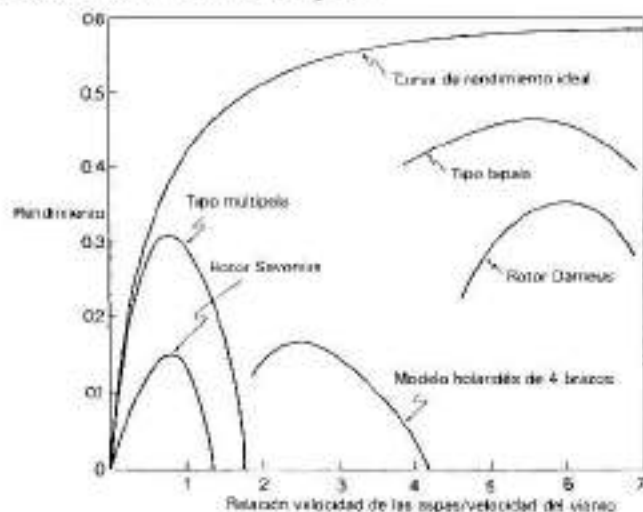


Fig. 8.- Rendimiento de distintos tipos de molinos.

El rotor Savonius es el tipo de aerogenerador de menor rendimiento y de menor velocidad de giro, debido a la gran turbulencia que provoca el movimiento de sus palas. Le siguen los tipos de eje horizontal multipala, adecuados para bajas velocidades pero ya con rendimientos más elevados.

El rotor Darrieus presenta rendimientos importantes para velocidades de rotación elevadas, y el tipo de aerogenerador de eje horizontal bipala es el que tiene el máximo rendimiento debido a que produce la mínima turbulencia.

Los molinos de viento utilizados en diversos lugares del mundo, desde hace siglos, tales como el Panemoma persa, los de La Mancha, los molinos holandeses o los cretenses, presentan en general rendimientos considerablemente inferiores a los tipos de aerogeneradores descritos aquí, a excepción del rotor Savonius.

APLICACIONES DE LA ENERGIA EOLICA

Los aerogeneradores pueden emplearse para la producción de potencia mecánica o energía eléctrica.

La producción de **potencia mecánica** suele estar asociada a ciertos requerimientos tales como el **bombeo de agua** o determinados **trabajos de molido**.

Las bombas hidráulicas pueden ser **centrífugas** o de **pistón**. Si se utiliza directamente (sin reducción por engranajes) la potencia mecánica en el eje, los aerogeneradores bipalas o tripalas son más adecuados para accionar bombas hidráulicas centrífugas que requieren elevadas velocidades de rotación. Por el contrario, un aerogenerador multipala es más apropiado para accionar bombas hidráulicas de émbolo.

Una aplicación de la energía eólica que puede tener futuro es la propulsión de petroleros y otros buques grandes, los cuales mediante velas especiales se ayudarían en los momentos de viento favorable y ahorrarían combustible.

La producción de electricidad es, para nosotros, sin lugar a dudas, la más interesante aplicación de los aerogeneradores y su uso está bastante extendido, pudiendo destinarse esta energía eléctrica a usos privados o para conectar con



Una posibilidad a considerar en el caso de viviendas aisladas es la utilización conjunta sobre la misma batería de un sistema solar de paneles fotovoltaicos y de un aerogenerador.

Los resultados de esta unión solar-eólica son muy interesantes, pues si el dimensionamiento de los paneles del aerogenerador es el correcto, el costo de la instalación, referido a la potencia eléctrica disponible, es bastante menor que si fuera exclusivamente fotovoltaica (Fig.10).

La unión solar-eólica permite, además, reducir el tamaño de la batería, dado que la suma de ambas energías (solar y eólica) a lo largo del año se mantiene mucho más estable que cualquiera de ellas por separado, lo que significa costes más reducidos de instalación y mayor seguridad de suministro continuado.

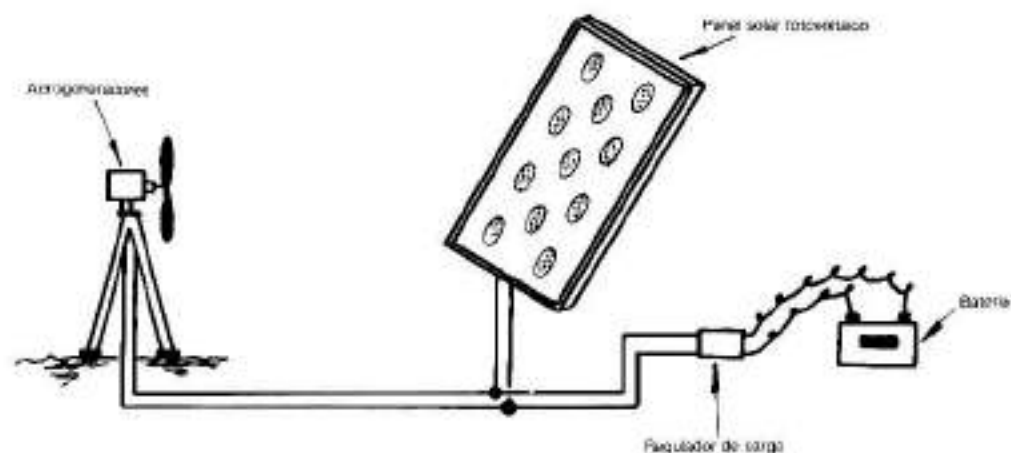


Fig. 10.- Unión solar-eólica.