

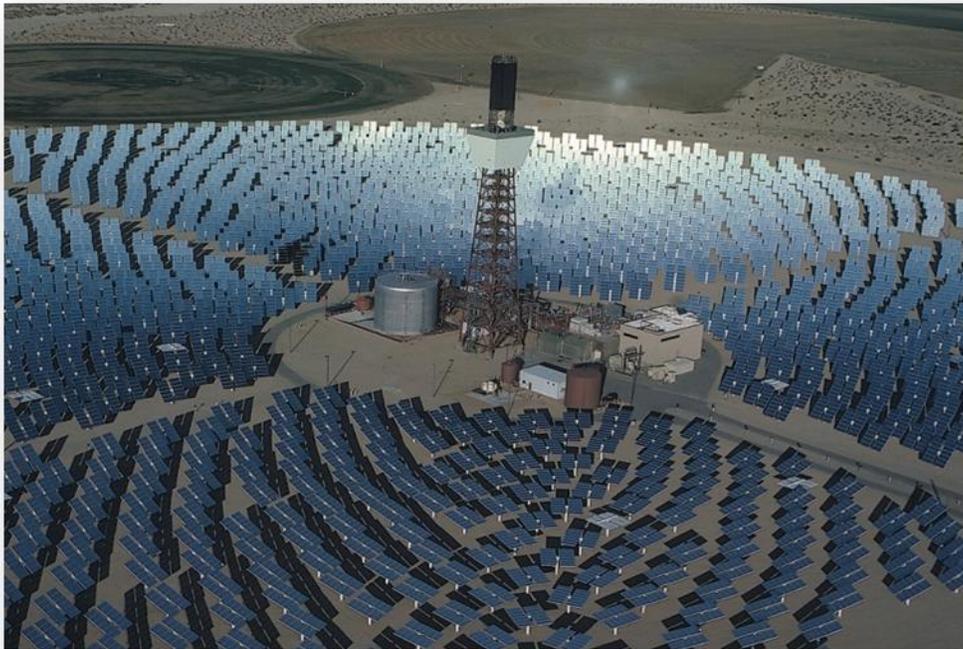


fcfm

Universidad de Chile
Escuela de Verano 2009
Curso de Energía Renovable

Guía Teórica

Experiencia Solar Fotovoltaica



Escrito por:
Sebastián Fehlandt
Karen Salvatierra

Enero 2009

Introducción



Una celda solar es un dispositivo capaz de transformar la energía solar en energía eléctrica por medio del **efecto fotoeléctrico**.

Básicamente las celdas solares están constituidas de materiales semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar se produce una excitación en los electrones quienes adquieren movimiento ocasionando una corriente eléctrica

¿Para qué sirven las celdas solares?

La energía generada por las celdas solares tiene uso en diversas aplicaciones. En tierra, las celdas se colocan en arreglos recibiendo el nombre de paneles solares, los cuales son usados en casas, autos, iluminación pública, radioteléfonos, etc. Otras de las aplicaciones importantes es la utilizada en satélites y sondas espaciales. La baja área y la posibilidad de usar al máximo la energía solar directa, hace uno de los desarrollos más formidables de esta tecnología.



Ventajas y desventajas

Esta forma de generar energía es una de las más limpias, seguras y confiables de todas las energías renovables, además de que su uso es fácilmente aplicable. Lamentablemente tiene dos grandes desventajas: su alto costo de construcción, ya que los materiales usados son de altísimo valor y recursos escasos, y la segunda es lo contaminante que es su construcción, ya que los materiales son muy dañinos y peligrosos sin la debida manipulación. Las celdas están construidas principalmente por Silicio, material que tiene la particularidad de estar entre los materiales que no son ni aislante ni conductor, sino un semiconductor. También, en otros desarrollos, las celdas están compuestas por Arsénico, Galio, Plomo, Aluminio, Indio, Selenio, que mezclados correctamente, son capaces de realizar el mismo efecto fotoeléctrico pero con mejores resultados.

En 1887, mientras en Chile se firma la ley que permite a las mujeres tener grados académicos, Heinrich Rudolf Hertz hace las primeras aseveraciones sobre las ondas electromagnéticas y el efecto fotoeléctrico. Pero fue antes, en 1883, que Charles Fritts crea la primera celda solar que era de Selenio, con una capa fina de Oro. No fue hasta 1946 que el científico estadounidense, Rusell Ohl, pionero en usar semiconductores y crear los transistores, quien patentó el invento de las celdas solares. Y más tarde, sus investigaciones lo condujeron al Germanio para los dispositivos como los Diodos, transistores, etc., y la posterior construcción de las celdas con Silicio dopado.

Explicación teórica

El efecto fotoeléctrico

La luz es una clase de radiación electromagnética que viaja a una velocidad finita y que se comporta de manera dual dependiendo del fenómeno que se esté estudiando. En ciertos casos se manifiesta como onda y en otras como partícula.

A principios del siglo XX el hecho de incidir luz sobre ciertos materiales y obtener una corriente eléctrica (electrones moviéndose con una energía cinética asociada) no era posible explicarlo con los estudios sobre la naturaleza ondulatoria de la luz.

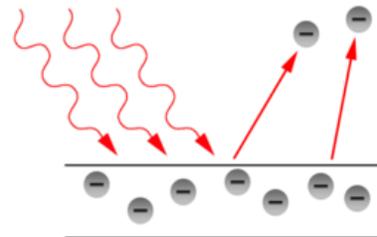
Por lo demás, el fenómeno presentaba ciertos aspectos especiales: no cualquier tipo de luz era capaz de producir corriente eléctrica. Si se hacía incidir luz visible de baja frecuencia (por ejemplo rojo), el fenómeno no ocurría, ni siquiera aumentando la intensidad de la fuente. Sin embargo, si se hacía incidir luz visible de alta frecuencia (por ejemplo azul) el efecto fotoeléctrico ocurría y sin importar la intensidad de la fuente.

La contradicción radicaba en que la teoría ondulatoria aceptada en la época predecía lo contrario. Si la luz fuese una onda, la energía contenida en una de esas ondas dependería solamente de su amplitud, esto es, de la intensidad de la luz. Otros factores como la frecuencia, no deberían hacer ninguna diferencia. Entonces, por ejemplo, luces infrarroja y ultravioleta de la misma intensidad deberían desprender el mismo número de electrones y la máxima energía cinética de los dos conjuntos de electrones también debería ser la misma. Disminuyendo la intensidad, se tendrían menos electrones, saliendo más lentamente; si la luz es muy débil, no se obtendría ningún electrón, no importa qué frecuencia esté usando.

En 1900, Max Planck propuso que la energía de una molécula vibrante explicaba los resultados experimentales solo si se asumía que ésta era *quantizada*, es decir, solamente podía tomar ciertos valores. La energía debería ser proporcional a la frecuencia de vibración y parecía llegar en pequeños "bloques" de la frecuencia, multiplicados por una cierta constante, la que actualmente se le conoce como "constante de Planck"

Fue en ese contexto que resurgió con fuerza la teoría corpuscular de la luz, es decir, explicar la luz como pequeños paquetes de energía sin masa que viajan a 300.000 km/s a los cuales se les denominó "fotones".

Luego, si se dirige un haz de luz sobre la superficie de un metal, se estará obligando a los fotones a chocar con este material haciendo que se colisionen con los electrones, quienes se desprenderán y se moverán gracias a la energía de estas partículas dejando huecos que serán llenados por otros electrones haciendo que se produzca una corriente eléctrica, siempre y cuando la energía de la radiación es lo suficiente como para producir el fenómeno.



Espectros de luz

La luz tiene un espectro de colores donde cada color puede determinar la frecuencia de éste. Una de las cualidades del fotón es que su energía depende de su frecuencia según la siguiente fórmula:

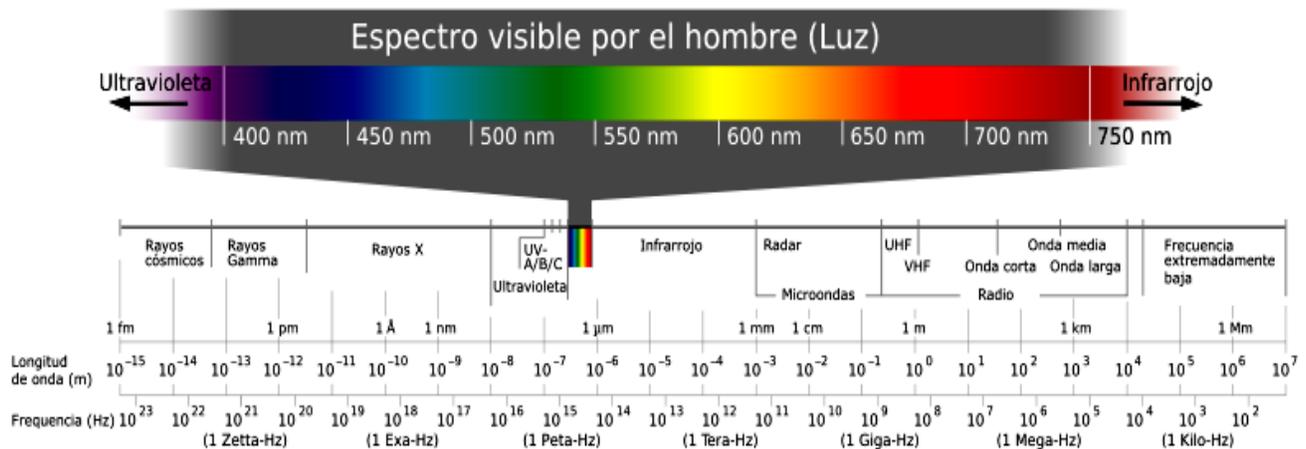
$$E=h*f$$

Donde “h” corresponde a la constante de Planck y “f” a la frecuencia del fotón.

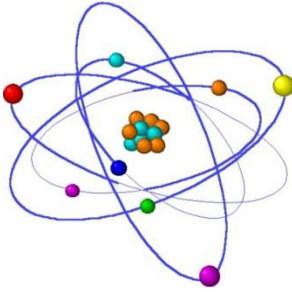
Por su parte, es posible relacionar la frecuencia del fotón con la longitud de onda de éste mediante la ecuación:

$$v = \lambda * f$$

Donde “v” es la velocidad de la onda y “λ” la longitud de onda, la que corresponde al color que tiene la luz de ese fotón. En el caso de la luz blanca, existen fotones con distintas frecuencias en un solo haz. Y por lo tanto dependiendo del ángulo de incidencia y la frecuencia del fotón podemos tener distintos resultados.

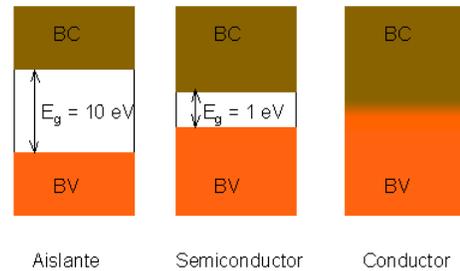


La celda fotovoltaica

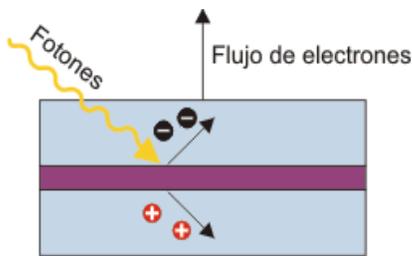


En un átomo aislado existen estados o niveles de energía discretos, donde el electrón “puede” estar, es decir, no es posible afirmar con certeza el lugar en que éste se encuentra. Cuando estos átomos forman moléculas, sus niveles se condensan hasta formar varias bandas continuas donde existen ciertos números de electrones que conviven en esta banda. Además, entre estas bandas, existe una zona prohibida de energía. El penúltimo estado con electrones se llama Banda de Valencia y el último se llama Banda de Conducción. Entre ellos está la zona prohibida o GAP de energía.

A temperatura normal, los aislantes tienen su Banda de Valencia completamente llena y un salto de energía necesaria o GAP resulta ser muy grande. Los conductores tienen la banda de valencia muy cerca de la banda de conducción, o sea, un GAP casi cero. Los conductores muy buenos tienen un fenómeno llamado traslape, en el cual la zona de conducción, donde los electrones están más libres, se confunde con la banda de valencia, por lo tanto no existe GAP.



En el caso de los semiconductores, existe un GAP pequeño que a temperatura normal no permite a los electrones salir de la banda de Valencia. Con ésta totalmente copada, no existe conducción eléctrica. Es aquí donde la energía de un “fotón”, partícula de la cual se compone la luz y que tiene cualidades especiales, es entregada a un electrón de la banda de valencia. Si la energía entregada es suficiente puede el electrón saltar el GAP y llegar a la banda de conducción. Además de esto, existe un espacio vacío disponible para que otro electrón lo ocupe. Con esto permite un movimiento de electrones que genera energía eléctrica.



$E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$
 $E_g(\text{Ge}) = 0,66 \text{ eV}$
 $T = 300 \text{ K}$

Las celdas solares se agrupan en paneles para abastecer grandes cargas, ya que una sola unidad no sería capaz de sostener grandes corrientes sin bajar su tensión. La potencia luminosa, que en la superficie de la tierra es de 1 [kW] es transformada en potencia eléctrica según la relación:

$$P=V*I$$

Al conectar distintas cargas y dependiendo de las características del panel, los valores de V e I variarán, variando con esto la potencia.

La celda y su funcionamiento como semiconductor

Ya advertimos que las celdas están formadas por materiales semiconductores, pero ¿qué se entiende por esto?

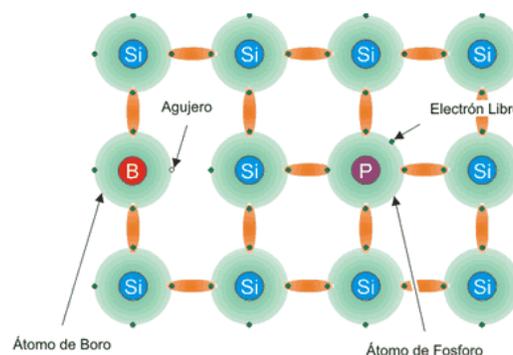
Los materiales semiconductores tienen la particularidad de comportarse como aislante o conductor dependiendo de la temperatura. Existen semiconductores intrínsecos y extrínsecos. Un ejemplo para el primer tipo viene dado por el Silicio, mientras que si se le agrega un pequeño porcentaje de impurezas se tiene uno del tipo extrínseco y se dice que está “dopado”.

Se puede dopar un semiconductor de dos formas:

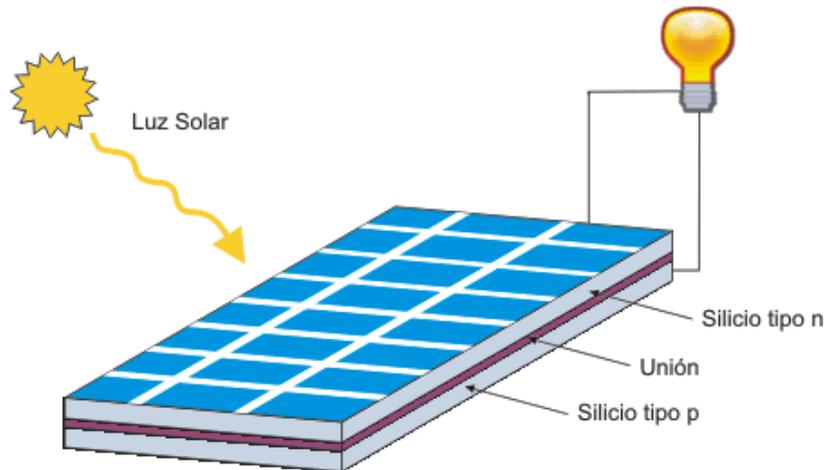
- **Tipo n:** añadiendo un cierto tipo de átomo para poder aumentar el número de portadores o cargas libres (electrones)
- **Tipo p:** al igual que antes con la diferencia que los átomos agregados aportan “huecos” (espacio generado por un electrón).

Una vez que los electrones que han capturado la energía de algún fotón queden dispuestos para la conducción, al encontrarse afectados al campo eléctrico formado en una juntura de semiconductores con distinto dopado, darán origen a una corriente eléctrica a través de la juntura si a ambos lados se conecta una carga.

Por ejemplo un átomo de Silicio tiene 4 electrones de valencia que enlazan a los átomos adyacentes. Si se sustituye un átomo de Silicio por un átomo que tenga 3 o 5 electrones de valencia se producirá un espacio sin un electrón (doping tipo p) o un electrón extra (doping tipo n), respectivamente, que pueda moverse más libremente que los otros (ésta es la base del doping).



La radiación de ciertas longitudes de onda puede ionizar los átomos de Silicio y el campo eléctrico producido por la unión que separa algunas de las cargas eléctricas positivas (agujeros) de las negativas (electrones libres) dentro del dispositivo fotovoltaico hace que los agujeros se muevan hacia la capa positiva o capa tipo p y los electrones hacia la capa tipo n. Para que los electrones libre se recombinen con los agujeros estos deben pasar a través del circuito produciéndose así una corriente eléctrica.

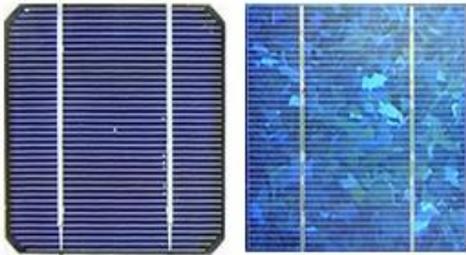


Características y tipos

Las celdas solares tienen dos características fundamentales: tipo de celda y eficiencia.

Existen tipos de celda hechas de silicio y celda hechas de otros compuestos. Dentro de las primeras se encuentran las policristalinas y monocristalinas.

Por otro lado, la eficiencia de la celda es un parámetro importante, porque a mayor eficiencia en una misma área, mayor es la energía obtenida.



Para las celdas solares existen 4 etapas o generaciones, tecnologías de construcción de celdas solares, que han ido cambiando a través de los años:

- **Primera generación de celdas:** consta en Celdas a base de Silicio, Monocristalinas o Policristalinas. Estas celdas generalmente llegan a eficiencias de 18% con algunas excepciones (las policristalinas solo llegan a eficiencias del orden del 12%).
- **Segunda generación:** son las celdas de varias capas de diversos compuestos. Estas celdas llegan a eficiencias del 37%.
- **Tercera generación:** es la más joven y se caracteriza por usar nanotecnología (técnica que trabaja a escala de $10^{-9} - 10^{-6}m$, algo así como 1000-100.000 veces más delgado que un cabello de tu cabeza)
De esta forma es posible mejorar la obtención del espectro solar y manipular la interacción con los electrones obteniendo resultados hasta el 42% de eficiencia. Esto se realiza a través de una lámina de Thin-Film, que refleja los colores de la luz en zonas específicas de la celda solar. Esto aún está en desarrollo, pero se han obtenido buenos resultados.
- **Cuarta y última generación:** aún está en investigación, no consisten en celdas basadas en materiales metálicos, sino en materiales polímeros y usando nanotecnología.

Aplicaciones y concentradores

Como la radiación solar no es constante durante el día, y no todas las cargas logran transferir igual cantidad de potencia, no es posible conectar las celdas directamente a los consumos. La solución pasa por usar reguladores de carga y/o bancos de baterías.

Al conectar un panel solar a un banco de baterías se regula automáticamente el voltaje, manteniéndose constante mientras que la corriente varía dependiendo de la carga. Sin embargo la potencia transmitida al banco de baterías depende de la carga correspondiente a dicho banco, existiendo una carga óptima para la cual la potencia transferida es máxima.

La función del regulador de carga es que el panel “vea” una carga tal que la potencia transmitida sea máxima al ser conectado a un banco de baterías, que tienen la ventaja de mantener la tensión constante ante grandes demandas de corriente. Como la energía debe conservarse, si un banco de baterías que fue cargado por un arreglo de paneles durante cierto tiempo es conectado a una carga que demande una potencia mayor que la del panel, podrá alimentarla por un tiempo menor que el tiempo de carga.

Un ejemplo de regulador para baterías consiste en un MPPT (Maximum power point tracker), el cual consiste en un dispositivo DC/DC que regula el voltaje de salida. Este dispositivo tiene 2 etapas de funcionamiento:

- La primera, consiste en buscar el punto de máxima transferencia de potencia, para esto va probando con distintos voltajes de salida, mide la corriente y calcula la potencia, de esta forma busca el punto de máxima potencia. Esta etapa tiene una duración aproximada de unos 10 segundos, dependiendo del dispositivo.
- Luego entra en la segunda etapa, la que consiste en cargar el banco de baterías, en el punto de máxima transferencia de potencia encontrado en la primera etapa, durante aproximadamente 1 minuto, para luego volver a realizar la primera etapa.

Este alternamiento entre las etapas tiene el objetivo de cargar siempre en el punto de máxima transferencia de potencia, punto que puede variar dependiendo de la posición del sol, nubes, cambios en la carga conectada al banco de baterías (por ejemplo: si se enciende una luz más o se enchufa algún otro dispositivo eléctrico en una casa con este sistema), etc.

Un ejemplo de aplicación de éste sistema consiste en el proyecto de Electrificación rural realizado por alumnos de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en conjunto con alumnos de intercambio, en la localidad de Mineral de Talca a 50 Km de Ovalle. El cual consiste en la instalación de paneles solares para la iluminación de viviendas rurales. El dispositivo MPPT utilizado en este proyecto es el MX60, de la empresa OutBack Power Systems. El cuál además de cargar las baterías tiene etapas de mantenimiento de las mismas, que comienzan a funcionar cuando ésta se encuentra totalmente cargada.



Como los paneles más eficientes disponibles comercialmente convierten alrededor de un 20% de la energía luminosa en energía eléctrica, se requieren grandes áreas de paneles para abastecer el equivalente a una casa típica. Sin embargo, existen aplicaciones móviles experimentales como automóviles.

En Chile, es muy poco lo que se ha hecho respecto a la energía generada por celdas solares. Por eso, la aplicación más importante es en la implementación en el Auto Solar Eolian. Más de 400 celdas, de diversas tecnologías, se unieron para alcanzar la competencia mundial de Autos Solares. Panasonic World Solar Challenge.



Construyendo una celda solar casera

Dado que las celdas solares están hechas de materiales con propiedades semiconductoras, en esta experiencia se tratará de formar un tipo de semiconductor utilizando láminas de cobre y calor.

El cobre es un tipo de material que expuesto al aire, el color rojo salmón inicial se torna rojo violeta por la formación de óxido cuproso (Cu_2O) para ennegrecerse posteriormente por la formación de óxido cúprico (CuO).

En esta actividad se calentará una lámina de cobre directamente al fuego de tal forma que a medida que pase el tiempo se observará la formación de una capa negra (óxido cúprico) debajo de la cual se encontrará una fina capa de óxido cuproso de color rojizo. Una vez que se deja de calentar, la lámina comienza su enfriamiento, y dado que el óxido negro y el cuproso tienen una tasa distinta de contracción, el óxido negro comienza a descascararse, dejando simplemente la capa rojiza de óxido cuproso, la cual tiene las propiedades semiconductoras.

