



Celdas solares y la tecnología del silicio

José de Jesús Martínez Basilio
Claudia Antonio Hernández

Introducción

Actualmente se buscan nuevas alternativas para generar energías libres de contaminantes que afecten lo menos posible al medio ambiente. En esta búsqueda se encuentra el desarrollo de las celdas solares basadas en silicio cristalino, donde su principio de funcionamiento se encuentra en la conversión de energía tomando como fuente la radiación solar. La importancia y sus principales características de funcionamiento se muestran en este trabajo.

Hoy en día, las dificultades que existen para satisfacer la demanda de energía por medio del uso de combustibles basados en carbón, petróleo y gas han crecido de manera dramática. El consumo que actualmente requieren las grandes urbes puede provocar que las tendencias de este tipo de combustibles se acaben en un futuro no muy lejano. Por otra parte, y debido a al impacto ambiental generado día con día

al planeta, se ha generado un panorama de crisis energético a nivel mundial. Por lo que la búsqueda de energías alternas que puedan sustituir a las fuentes tradicionales actualmente se han convertido en un tema de interés.

Bajo esta tendencia, en las últimas décadas se ha encontrado en las denominadas energías verdes (también conocidas como renovables) una opción viable y prometedora para sustituir a los combustibles fósiles. Teniendo como principal ventaja, no generar daño ecológico a nuestro planeta, además de presentarse en la naturaleza de forma inagotable. Energías como eólica, hidráulica, biomasa y solar son ejemplos de energías que actualmente están siendo aplicadas en gran parte del mundo como una alternativa sustentable. De todas ellas, la solar posee mayor expectativa debido a que puede ser ampliamente aprovechada mediante el uso de dispositivos fotovoltaicos, donde la celda solar es el principal componente.

La radiación solar

El sol es la estrella más cercana a la Tierra y es el responsable de la vida en nuestro planeta. La Tierra recibe de manera continua la radiación solar como resultado del proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el Sol. A lo largo de la historia, el hombre y los demás seres vivos han utilizado esta energía limpia y gratuita como fuente de vida. La irradiancia solar total que llega al exterior de la atmosfera de la Tierra tiene un valor aproximado de $1,365\text{W/m}^2$ y es conocida como *constante solar*. En términos de distribución espectral, es referida como *MASA DE AIRE CERO* (AM0 por sus siglas en inglés).

Donde el término Masa de Aire (AM) se define como la medición de absorción que se lleva a cabo en la atmosfera (Luque y Hegedus, 2011).

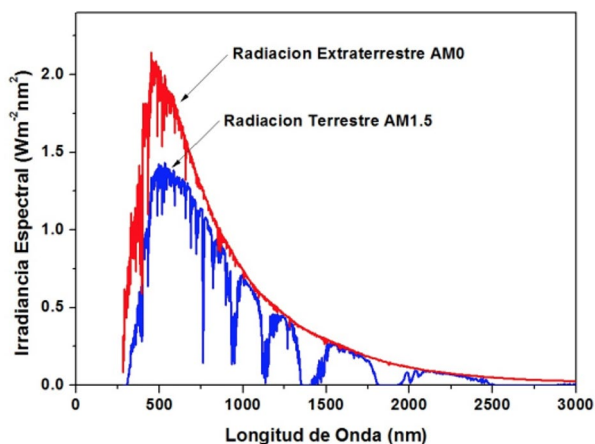


Figura 1. Distribución espectral de la intensidad de radiación. Fuente: Solar Spectra (s.f.).

Cabe mencionar que no toda la radiación alcanza la superficie terrestre, ya que al pasar a través de la atmosfera, varias porciones del espectro solar son reflejadas o absorbidas, principalmente por moléculas de agua, carbono y oxígeno (Goetzberger, Knobloch y Voss, 1998) causando una disminución de la irradiancia hasta un valor promedio de 1000W/m^2 , valor conocido como espectro AM1.5 (véase Figura 1). El espectro AM1.5, actualmente se ha definido como condiciones de prueba estándar (Standard Test Condition, STC) utilizado por la industria fotovoltaica para la caracterización de las celdas solares.

Estatus actual de las celdas solares

En lo concerniente a la fabricación de celdas solares, actualmente existe un enorme progreso tecnológico a nivel mundial donde se han desarrollado e innovado diversos procesos de fabricación de dispositivos fotovoltaicos a través del uso de distintos materiales, con el objetivo de aprovechar al máximo la radiación solar y de esta manera lograr las mayores eficiencias de conversión posibles. Actualmente las tecnologías de celdas solares se dividen en tres grandes generaciones (Gangopadhyay, Sukjendu & Das, 2013; Askari, Mirzaei & Mirhabibi, 2015).

- Primera generación: Este tipo de solares basan su funcionamiento en la unión-pn y comúnmente son fabricadas sobre obleas de silicio, ya sea cristalino (c-Si) o poli-cristalino (poly-Si).

- Segunda generación: Están basadas en la tecnología de película delgada (Thin Film) y se subdivide en tres grupos: 1) Silicio amorfo (a-Si); 2) Telurio de Cadmio (CdTe); 3) Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIGS) así como Cobre, Indio y Selenio (CIS).
- Tercera generación: Se caracterizan por utilizar en su fabricación materiales orgánicos que sustituyen a los semiconductores. Este tipo de celdas orgánicas están en desarrollo por lo que no han sido ampliamente comercializadas.

A pesar de las diversas tecnologías que existen para el desarrollo y fabricación de celdas solares, es la tecnología del silicio (policristalino y monocristalino) es la que actualmente domina el mercado fotovoltaico abarcando más del 80% de la producción mundial (Goetzberger y Hoffmann, 2005). El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y debido a que presenta diversas ventajas sobre el resto de las tecnologías, los paneles solares basados en esta tecnología duran más de 20 años y la tecnología del silicio ha sido ampliamente estudiada por la industria semiconductor. Por tal motivo se espera que dicha tecnología siga dominando el mercado fotovoltaico.

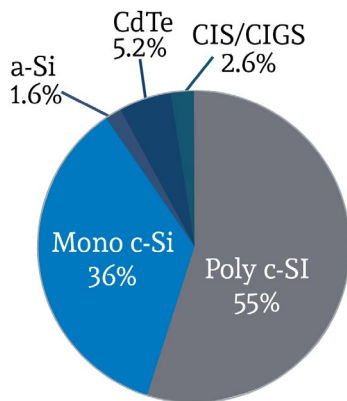


Figura 2. Diferentes tecnologías para el desarrollo de Celdas Solares. Fuente: (Goetzberger y Hoffmann, 2005).

Celda solar de Silicio

Las celdas solares son dispositivos que tienen la capacidad de transformar la radiación incidente del Sol en corriente eléctrica, por medio del efecto fotovoltaico (Blakersa, Zina, McIntosh y Fonga, (2013). El efecto fotovoltaico consiste básicamente en la separación de los portadores de carga huecos (h^+) y electrones (e^-) Estos se excitan dentro de la celda solar una vez que esta es iluminada. Posteriormente, son colectados por los contactos metálicos y producen una corriente eléctrica (véase Figura 3).

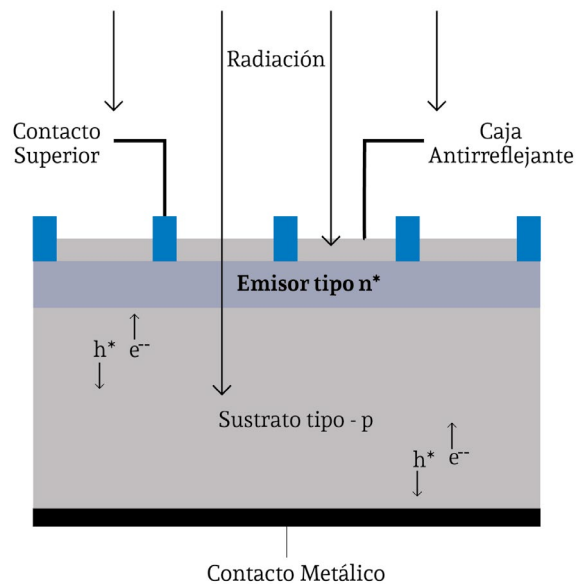


Figura 3. Esquema de una celda solar básica. Creación de pares electrón-hueco e^- y h^+ .

Las celdas solares basadas en la tecnología del silicio cristalino (c-Si) consisten básicamente en un material semiconductor tipo- p denominado base, y otro tipo- p llamado emisor; para formar una unión pn en donde en la interfaz de dicha unión se

lleva a cabo la separación de los portadores de carga. También emplean una capa delgada como película antirreflejante para disminuir las pérdidas por reflexión, siendo el dióxido de silicio (SiO_2), el dióxido de titanio (TiO_2) y el nitruro de silicio (SiN_x) los materiales comúnmente utilizados para la fabricación de dichas capas (Ali, Khan & Mat, 2014).

Finalmente, se tienen los contactos metálicos para extraer los portadores de carga, sacarlos de la celda solar y producir, de esta forma, la fotocorriente. Es importante resaltar que la rejilla para formar los contactos metálicos superiores se deben diseñar de tal manera que no ocupen mucho espacio en la superficie como se observa en la Figura 4. De lo contrario, aumentaría el área de sombreado en las celdas solares, lo cual se traduciría en menor captación de la radiación solar.

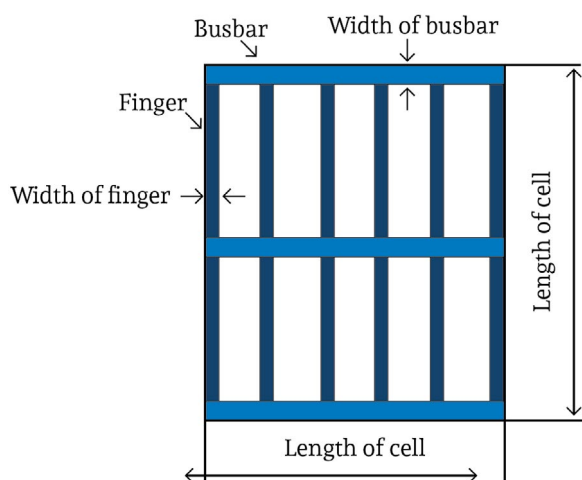


Figura 4. Diseño de la rejilla para la formación del contacto superior. Fuente: Lee & Rao (2016).

Principios de funcionamiento

Cuando la radiación solar incide sobre la superficie de las celdas, los fotones o haces de luz, con energía suficiente podrán ser absorbidos por el material semiconductor y podrán liberar un electrón. Por cada electrón liberado se generará un hueco en su lugar proporcional. Es importante mencionar que después de cierto tiempo, la energía ganada por estos portadores se pierde poco a poco, haciendo que estos vuelvan a un estado de reposo. Los electrones y huecos que alcancen la interfaz (juntura) de la unión *-pn* podrán ser separados por un campo eléctrico creado en dicha interfaz, y de esta manera, llegar a los contactos metálicos para dar origen a una foto-corriente como se muestra en la Figura 5.

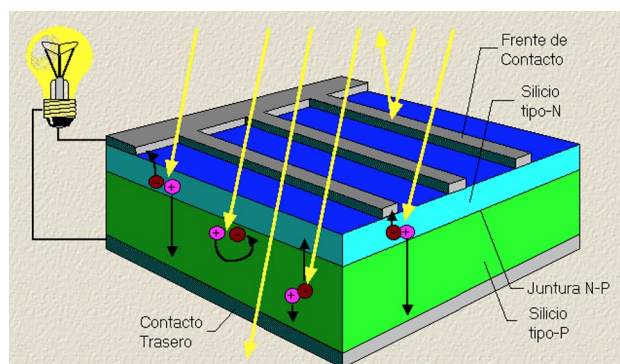


Figura 5. Esquema de Funcionamiento de una Celda solar de silicio. Fuente: Universidad de Chile (s.f.).

Parámetros de desempeño:

De manera ideal, una celda solar puede ser representada por una fuente de corriente conectada en paralelo con un diodo, una

resistencia en paralelo y una en serie, como se muestra en el circuito equivalente de la Figura 6. La fuente de corriente emula a la radiación solar, el diodo representa al corazón de la celda solar y las resistencias parásitas (serie y paralelo) representan las pérdidas que presentan las celdas solares reales.

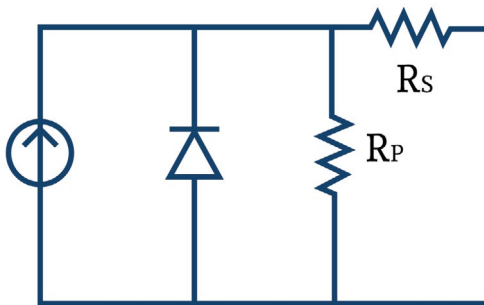


Figura 6. Circuito equivalente de una celda solar.
Fuente: Goetzherger y V.U. Hoffmann (2005).

En la Figura 7 se muestran las curvas características corriente-voltaje (I-V) de una celda solar ideal (Goetzberger y V. U. Hoffmann, 2005). La primera curva corresponde al diodo y es la medición de la celda solar en oscuridad, es decir, sin la fuente de corriente. Mientras que la segunda pertenece a la celda solar bajo iluminación, bajo condiciones de prueba AM1.5. De forma gráfica, la corriente de corto circuito (Isc), que es la corriente máxima producida por una celda solar cuando sus terminales están cortocircuitadas y se obtiene cuando el voltaje es cero.

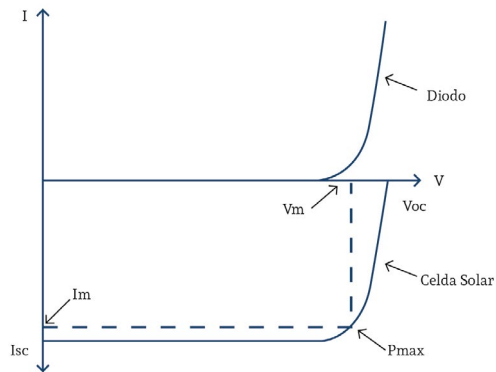


Figura 7. Curvas I-V características de una celda solar ideal.

Por otra parte, el voltaje de circuito abierto (Voc) es el voltaje máximo que puede tener la celda cuando sus terminales están abiertas. Lo anterior está dado por el punto en el cual la curva característica I-V de la celda solar bajo iluminación corta el eje de V, es decir, cuando Isc vale cero.

Otro parámetro importante es el Factor de Llenado (FF por sus siglas en ingles). De manera gráfica, se obtiene a partir del rectángulo formado por los puntos del voltaje máximo (Vmax), la corriente máxima (Imax) y la potencia máxima (Pmax).

Finalmente, la eficiencia (η) de una celda solar se define como la razón de la potencia máxima de salida del dispositivo entre la potencia de la luz incidente y se puede expresar de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{max}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{max}}$$

Los valores de los parámetros en la celda solar de c-Si de alta eficiencia (PERL) son: Voc de 700 mV, Isc de 40 mA/cm² y FF de 80% Eff 25% (Green, et al., 2015).

Conclusión

Actualmente, el mercado fotovoltaico es dominado por la tecnología del silicio por sus diversas ventajas sobre el resto de las demás. A pesar de que se ha logrado eficiencia record del 25%, eso ha sido a nivel laboratorio ya que a nivel industrial la eficiencia oscila en un 20%. Por tal motivo, se espera que se busquen nuevas alternativas en la fabricación para aumentar la eficiencia disminuyendo costos.

Referencias bibliográficas:

- Ali, K., Khan, S. A. & Mat Jafri, M. Z. (2014). Effect of double layer (SiO₂/TiO₂) antireflective coating on silicon solar cells. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(3), 1-10.
- Askari, M., Mirzaei Mahmoud Abadi, V. & Mirhabibi, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*. 3(5), 94-113. DOI: 10.11648/j.ajop.20150305.17
- Blakersa, A., Zina, N., McIntosh K. R. & Fonga, K. (2013). High Efficiency. *Energy Procedia*, 33(1), 1-10.
- Gangopadhyay, U., Sukjendu, J. & Das, S. (2013). State of art of solar photovoltaic technology. *Journal of Energy*. 1-9, DOI: 10.1155/2013/764132
- Goetzberger A. & Hoffmann, V. U. (2005). *Photovoltaic solar energy generation*. United States of America: Springer Science.
- Goetzberger, A., Knobloch, J. & B. Voss. (1998).

Crystalline silicon solar cells. United Kingdom: John Wiley & Sons.

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 24(3), 1-9, DOI: 10.1002/pip.2728

Lee, H.-G. & Rao, S. S. (2016). Optimization of the Geometric Design of Silicon Solar Cells under Concentrated Sunlight. *American Journal of Mechanical Engineering*, 4(2), 50-59. DOI: 10.12691/ajme-4-2-2

Luque, A. & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. United Kindom: John Wiley & Sons.

Solar Spectra (s.f.). NREL Transforming Energy. Recuperado de: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>

Universidad de Chile, Ciencias de la Computación (s.f.) *Celda Fotovoltaicas*. Recuperado de: <https://users.dcc.uchile.cl/~roseguel/celdasolar.html>