

## Eficiencia de una celda solar común y su comparación con celdas de tecnología HIT

Julio Barzola<sup>a</sup>, Luca Rubini<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaqui, Ecuador  
jjbarzol@espol.edu.ec

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial, Universidad de Roma La Sapienza, Vía Eudossiana 18, Roma, Italia  
Luca.Rubini@uniroma1.it

### Resumen

La irradiación solar es una fuente de energía renovable que actualmente está siendo aprovechada a nivel mundial para la producción de energía eléctrica de manera limpia sin emisión de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. Esta producción eléctrica se lleva en efecto en las superficies de los paneles fotovoltaico constituidos por celdas solares.

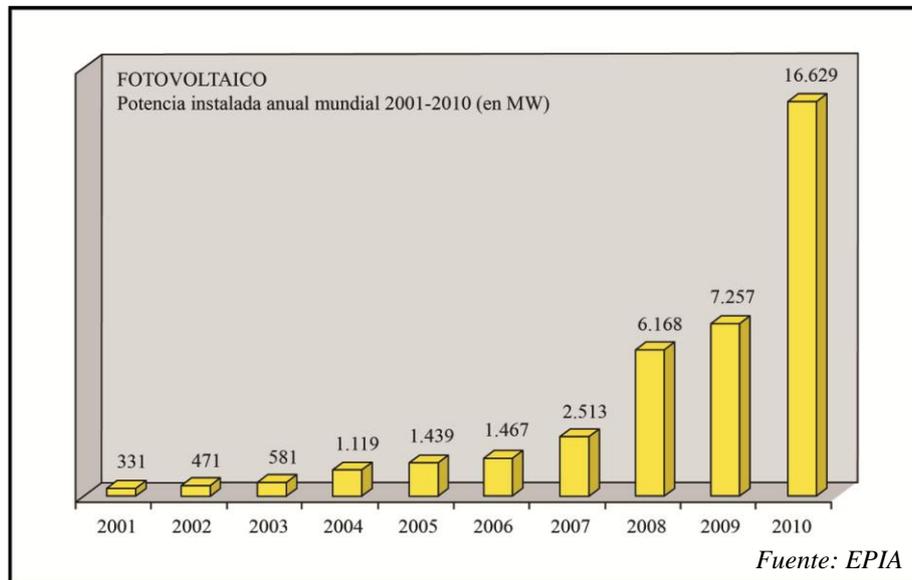
Cabe señalar que estas celdas son actualmente un campo de investigación en universidades e industrias que buscan aumentar la eficiencia de producción eléctrica y pasar el umbral del 16%. El presente trabajo expone los principios físicos y químicos de una celda solar, los tipos en el mercado y a que se debe su baja eficiencia; además, se presentará una innovación tecnológica conocida como HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) que logra una eficiencia de celda del 19%.

**Palabras Clave:** Fotovoltaico, Eficiencia celda solar, efecto fotoeléctrico, HIT.

### 1 Introducción

El término *renovable* solamente se aplica a fuentes energéticas que pueden ser reemplazadas en un tiempo menor o igual al tiempo en el cual es utilizada [1].

La energía solar es un tipo de energía renovable que está siendo aprovechada para producir energía eléctrica. En el decenio 2001-2010 la potencia instalada del tipo fotovoltaico ha tenido un crecimiento exponencial como se muestra en la fig. 1.



**Fig. 1.** Potencia instalada de fotovoltaico a nivel mundial en el decenio 2001-2010

Y recientemente se confirma que la potencia instalada del tipo fotovoltaico a nivel mundial ha superado los 100 GW a finales del año 2012 [2].

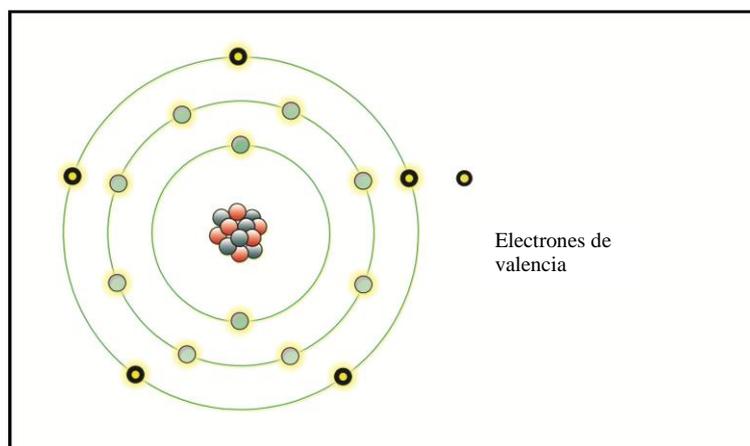
Sin embargo, como en todo sistema real el tipo fotovoltaico no alcanza una eficiencia ideal del 100% por varios aspectos como son las pérdidas energéticas de los módulos solares, de los inversores, de las baterías, de los cables, de los transformadores, condiciones climáticas, horas de insolación solar, entre otros.

## 2 Principios físicos y químicos en las células fotovoltaicas.

### 2.1 Materia: Conductora, aislante y semiconductor.

La materia está básicamente constituida por átomos, pero a su vez estos átomos están constituidos por partículas subatómicas como los protones y neutrones en el núcleo y los electrones en la periferia del mismo. Existiendo un estado natural de equilibrio de cargas positivas en el núcleo y cargas negativas de los electrones.

Como se muestra en la fig. 2, los *electrones de valencia* son aquellos que se ubican en el último nivel energético del átomo. Poseen una alta energía y son los que interactúan con otros átomos durante las reacciones químicas para formar moléculas y nuevas sustancias.



**Fig. 2.** Electrones de valencia de un átomo de silicio.

La materia presenta características eléctricas de conducción, aislamiento y semiconducción. La *conducción* se debe a que los electrones de valencia son poco atraídos por el núcleo y éstos a un mínimo estímulo externo (luz, calor, entre otros) pueden fluir con facilidad en una red cristalina u otra estructura molecular.

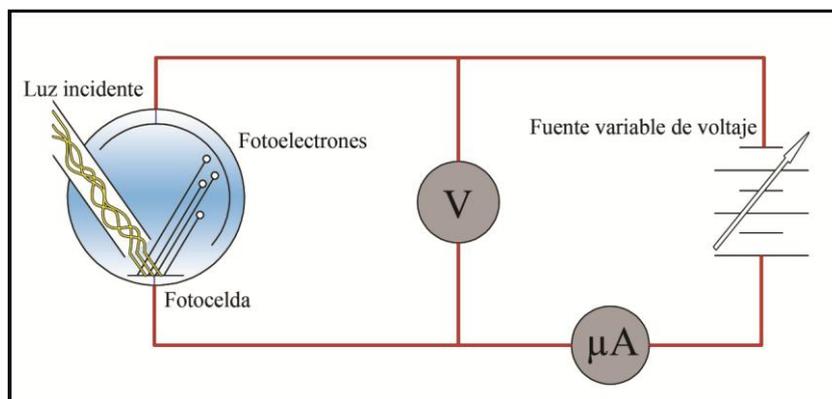
La *semiconducción* se debe a que los electrones de valencia son más atraídos por el núcleo pero si se les suministra una mínima cantidad de energía, estos son liberados y su comportamiento es igual como en la conducción.

Y por último, los *aislantes* presentan una estructura en la que los electrones de valencia son intensamente atraídos por el núcleo y es muy difícil de que se puedan desprender.

## 2.2 Efecto Fotoeléctrico.

La transformación energética solar-eléctrica se lleva a cabo en las celdas solares gracias al efecto fotovoltaico que fue observado por primera vez en el año 1887 por Heinrich Hertz, el cual consiste en la emisión de electrones cuando a una superficie metálica se le hace incidir una radiación electromagnética como la luz visible. La explicación de este fenómeno físico le hizo acreedor a un Premio Nobel a Albert Einstein en el año 1921[3].

Por otra parte, el término fotovoltaico proviene de la unión de dos palabras: la palabra *photo* cuyo origen griego 'phos' significa luz y la segunda palabra *volt* que es una raíz del apellido del científico italiano Alessandro Volta quien estudió fenómenos eléctricos; literalmente la palabra fotovoltaico significa *electricidad desde la luz*. Es decir, las celdas solares realizan la conversión solar-eléctrica sin necesidad de combustible ni partes mecánicas en movimiento como se muestra en la fig. 3 [4].



**Fig. 3.** Efecto fotoeléctrico y la generación de electricidad variable que dependerá de la intensidad de la luz sobre la superficie metálica de la fotocélula [5].

### 2.3 El silicio como materia prima para fotoceldas.

El silicio es un semiconductor que ocupa el 2do lugar de abundancia en la corteza terrestre y por lo general se lo encuentra formando óxidos como el cuarzo o silicatos en la arena y barro. Más del 90% de los paneles solares que se venden en el mercado, sus celdas fotovoltaicas son fabricadas a base de este elemento.

Luego del proceso de extracción del silicio de los minerales y compuestos, le sigue un proceso de purificación mediante sustancias químicas. Del grado de purificación dependerá su aplicación en la electrónica, celdas solares y metalurgia. El silicio utilizado para la fabricación de las células fotovoltaicas es de menor grado de pureza (99,9999%) comparado con aquel utilizado en la industria de la electrónica [4].

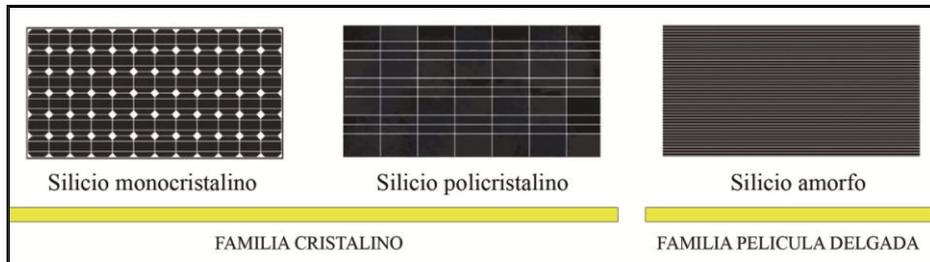
Una vez purificado se pueden formar estructuras cristalinas: monocristalina, policristalina y amorfa.

En la estructura *monocristalina* los átomos de silicio están ordenados, se orientan en una misma dirección y se enlazan los unos a los otros en una misma forma.

En la estructura *policristalina* los átomos de silicio se agregan en pequeños granos monocristalino y son orientados de manera casual.

En la estructura *amorfa* los átomos de silicio son orientados de manera casual como en un líquido pero conservan las características de los sólidos.

La fig. 4 muestra los distintos tipos de celdas cristalinas de silicio.



**Fig. 4.** Tipos de células fotovoltaicas en el mercado.

Un lingote de silicio monocristalino tiene un diámetro de 20 cm y aproximadamente un metro de altura, pesa de 70 a 75 Kg. Una vez que se enfría el lingote se le corta las superficies superiores e inferiores y se procede a cortar en rebanadas, cada rebanada se le conoce como *wafer* y constituyen la base de las celdas fotovoltaicas [4].

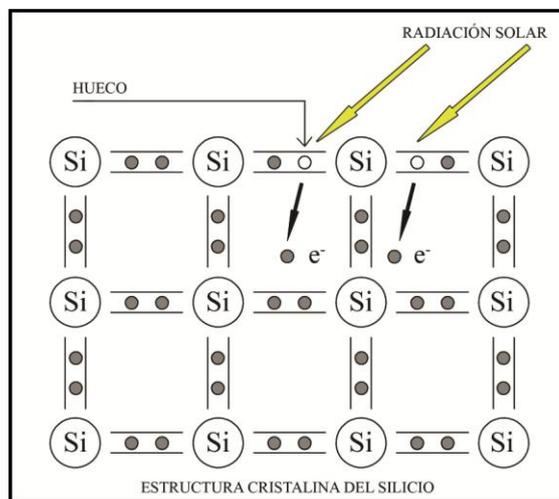
#### 2.4 Estructura de una celda fotovoltaica.

El silicio es un elemento químico constituido por átomos que tienen 4 electrones de valencia y debido a sus características semiconductoras requiere de una cierta cantidad de energía para comportarse como conductor.

Esta propiedad eléctrica es aprovechada en la construcción de celdas fotovoltaicas donde la energía solar logra romper los enlaces covalentes de los átomos del silicio y los electrones de valencia logran fluir con libertad en la estructura cristalina del semiconductor. La fig. 5 muestra los huecos o lagunas que dejan los electrones liberados.

Estos *huecos* o lagunas presentan una *carga positiva* debido a la ausencia de electrones. Puesto que los electrones y huecos se mueven difusivamente en el conductor, se presenta un efecto conocido como *recombinación* donde los electrones liberados pueden caer y ocupar los huecos de otros electrones que también han sido liberados.

Es evidente un panorama dinámico de electrones y huecos en total desorden a lo largo de la estructura cristalina del silicio. Si hubiese un campo eléctrico próximo a esta región se podría separar los electrones de los huecos y por ende producir una corriente eléctrica.



**Fig. 5.** Interacción entre electrones de un semiconductor y la energía solar.

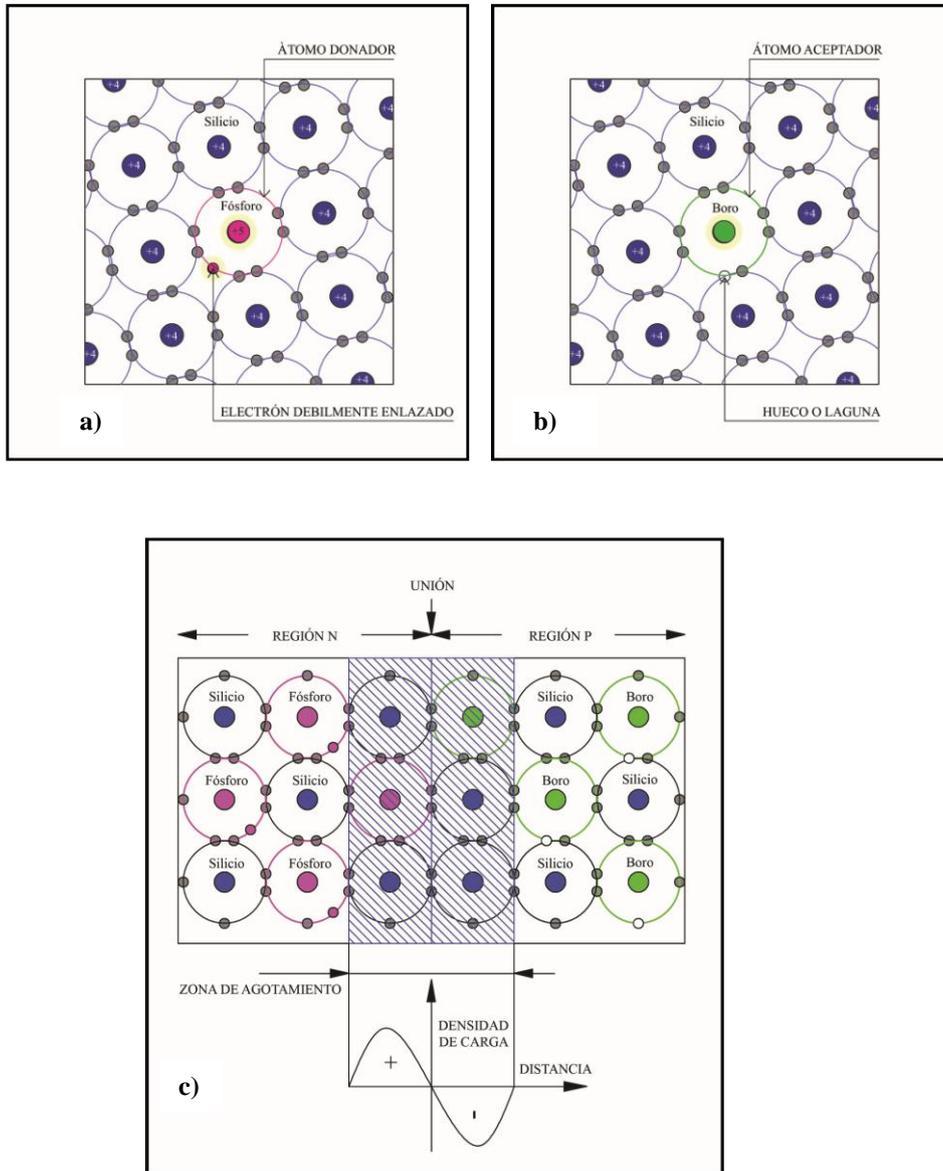
Aplicando el principio de potencial de contacto y la afinidad electrónica que tienen ciertas sustancias y materiales se podría crear un campo eléctrico en el interior del conductor. Una forma de lograr esto es mediante el *dopaje* de un wafer de silicio con elementos como el fósforo y boro formando respectivamente dos regiones tipo N y P.

La *región N* ha sido dopada con fósforo cuyos átomos tienen 5 electrones de valencia. Nótese en la fig. 6 a) que al formarse los enlaces entre los electrones del Si-P queda un electrón libre de este último. Por eso al átomo de fósforo se lo considera como *donador*.

La *región P* ha sido dopada con átomos del elemento boro que tienen 3 electrones de valencia formándose enlaces entre los átomos Si-B y quedando en evidencia un hueco como se muestra en la fig. 6 b). Por eso al átomo de boro se lo considera como *aceptador*.

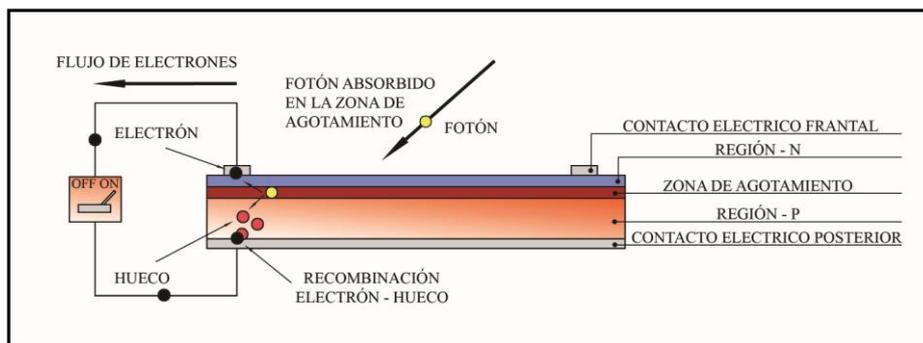
Al unir estas dos regiones los electrones de la *región N* se difunden hacia la *región P*. Al contrario, los huecos de la *región P* se difunden hacia la *región N*. Así, se forma en la unión NP una zona de densidad de carga o *de agotamiento* con signo positivo hacia el lado de la *región N* y con signo negativo hacia el lado de la *región P*.

Continúa este movimiento de desplazamiento hasta que el campo eléctrico generado en la zona de agotamiento actuará sobre el movimiento de los electrones-huecos y detendrá el proceso de difusión como se muestra en fig. 6 c).



**Fig. 6.** a) Dopaje región N; b) Dopaje región P y c) formación de la zona de agotamiento.

Los fotones de la radiación solar están provistos de suficiente energía que pueden crear parejas electrón-hueco en la zona de agotamiento, por eso la región N es de grosor más delgado para que la luz pueda llegar a la unión NP, los electrones son atraídos hacia la zona N (cargada positivamente) y los huecos hacia la zona P (cargada negativamente). Tal movimiento de carga es lo que origina la corriente fotovoltaica en la célula como se puede observar en la fig. 7 [7],[5].



**Fig. 7.** Movimientos de cargas y origen de corriente eléctrica en una celda fotovoltaica.

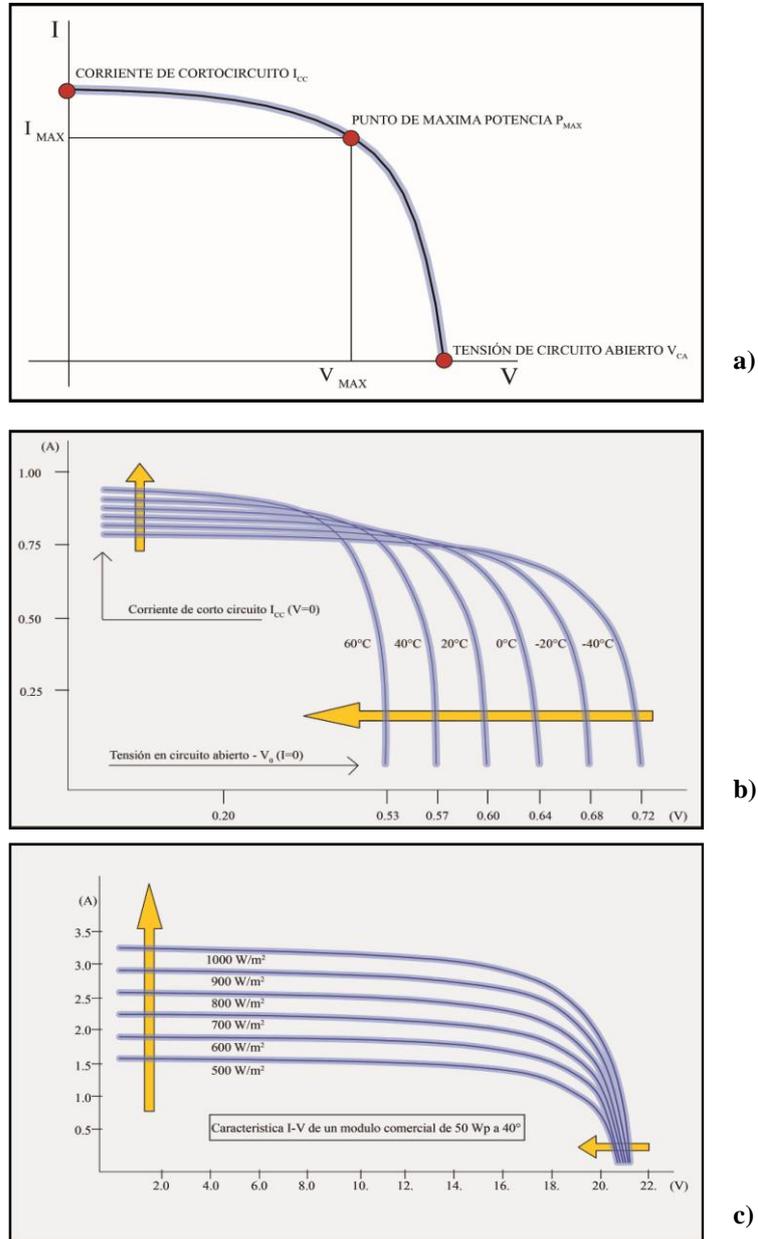
En fin, una celda fotovoltaica es sustancialmente un diodo ya que en su estructura presenta una unión PN entre dos semiconductores dopados P y N. Estas celdas tienen un espesor que oscila entre los 200-350  $\mu\text{m}$ .

### 3 Rendimiento de una celda común.

#### 3.1 Las celdas solares y sus parámetros eléctricos.

Como se mostró en el apartado anterior, las celdas solares se comportan como fuentes de corriente eléctrica. En la figura 8a se presentan las principales variables como son  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{cc}}$ ,  $V_{\text{max}}$ ,  $V_{\text{ca}}$  y el punto de máxima potencia  $P_{\text{max}}$  relacionadas con  $V_{\text{max}}$  e  $I_{\text{max}}$ .

Esta curva puede variar según la temperatura de trabajo, a mayores temperaturas disminuye el voltaje de la celda (fig. 8b) o también en función de la irradiación solar, a mayor insolación solar mayor será la corriente de la celda (fig. 8c). Es decir, que en función de condiciones de temperatura e insolación solar se obtiene una variación del punto de máxima potencia.



**Fig. 8.** a) Curva V-I de una celda solar. b) Curvas V-I según T. c) Curvas V-I según irradiación solar.

Considerando la curva V-I, la celda debe estar construida por un material cuya energía de los enlaces de los electrones de valencia no sea ni muy baja ni muy alta. Ni muy baja ya que se perdería gran parte de energía de los fotones incidentes y ni muy alta ya que solamente los fotones de mayor frecuencia en el espectro solar podrían romper los enlaces.

### 3.2 Factores que inciden en la eficiencia de conversión energética.

El rendimiento  $\eta$  de una celda solar se lo puede definir como un cociente entre la potencia eléctrica máxima  $P_m$  que puede suministrar la celda y el producto de la energía solar irradiada  $E$  que llega sobre una superficie  $A_c$  de la celda.

$$\eta = \frac{P_m}{E g A} . \quad (1)$$

Las celdas solares de silicio monocristalino pueden alcanzar en el laboratorio una eficiencia de hasta el 24%, pero una vez que se pasa a la cadena de fabricación a nivel industrial baja a un valor cercano al 15%. Es decir que en condiciones STC<sup>1</sup> ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $AM^2=1,5$ ); por cada 1000 vatios de energía solar que incidan sobre una superficie de  $1 \text{ m}^2$  solamente 150 vatios son aprovechados para la producción de electricidad.

A continuación se presentan los principales factores por los cuales las celdas solares llegan a niveles tan bajo de eficiencia.

#### 3.2.1 Energía de los fotones incidentes.

La energía solar que incide en forma de fotones a la superficie de la celda solar no tiene suficiente energía para romper los enlaces covalentes del material y así lograr un par electrón-hueco; o viceversa, los fotones tienen una energía muy alta cuyo excedente se disipa en forma de calor.

Se puede afirmar que un 50% de la energía que incide en la celda solar común se pierde según lo expuesto anteriormente. Actualmente se está investigando en nuevos materiales como el grafeno con el que se está experimentando y ha dado buenos resultados a nivel de laboratorio.

#### 3.2.2 Pérdidas por recombinación.

Los electrones liberados por los fotones pueden ocupar los huecos de otros electrones que previamente también han sido liberados. Esto provoca que la tensión de vacío del

---

<sup>1</sup> Condiciones estándar de medida, STC en sus siglas inglesas.

<sup>2</sup> AM es una medida de la distancia que recorren los rayos solares al atravesar la atmosfera.

silicio disminuya de 1,1 V hasta 0,6V en circuito abierto. Las pérdidas por este factor podrían llegar hasta el 15%.

### **3.2.3 Pérdidas por reflexión.**

Si se utilizara la oblea de silicio monocristalino luego del corte de la barra en el proceso de purificación la cantidad de luz que reflejaría sería de un 30%. Sin embargo, se han utilizado distintos recubrimientos que logran reducir este valor hasta al 10%.

### **3.2.4 Pérdidas por los contactos eléctricos.**

Para aumentar los niveles de corriente se unen grupos de celdas solares en lo que comercialmente se conocen como módulos. Se utilizan contactos eléctricos que de una u otra forma afectan la superficie de captación. Las pérdidas por este factor pueden llegar hasta el 8% y dependen del diseño de la celda.

### **3.2.5 Pérdidas por resistencia serie.**

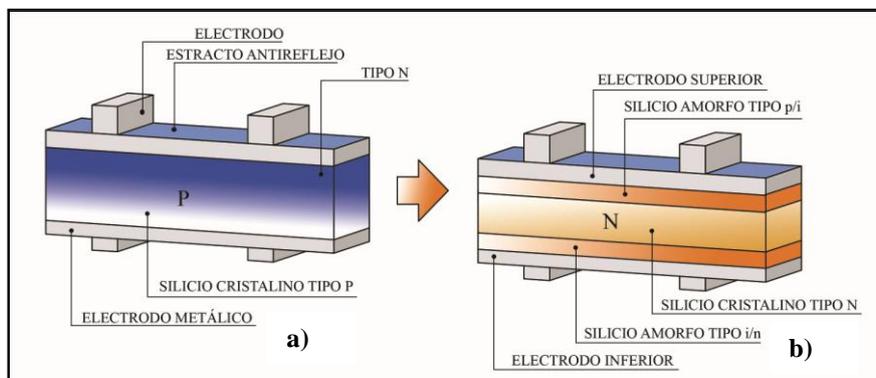
Al circular la corriente a través del silicio, debido a la naturaleza de este material y su inercia microscópica se produce un calentamiento conocido como efecto Joules. Pérdidas por este factor podrían estar entre el 2 y 3% [7].

## **4 Celdas del tipo HIT.**

A continuación se presentan las principales características de las celdas HIT y su convergencia a una mayor eficiencia en la conversión energética.

### **4.1 Estructura de una celda HIT**

HIT proviene de los términos ingleses Heterojunction with Intrinsic Thin-layer y hace referencia a la estructura de la celda solar de algunas capas finas. En la fig. 9 muestra las principales diferencias entre una celda común y una del tipo HIT. Las celdas HIT están compuestas de tres extractos de silicio: uno de silicio monocristalino tipo n y de dos delgados extractos de silicio amorfo (uno tipo p y el otro tipo n). Además, a lo largo de la superficie de unión entre el wafer monocristalino e silicio amorfo hay un extracto de silicio amorfo no dopado (intrínico).



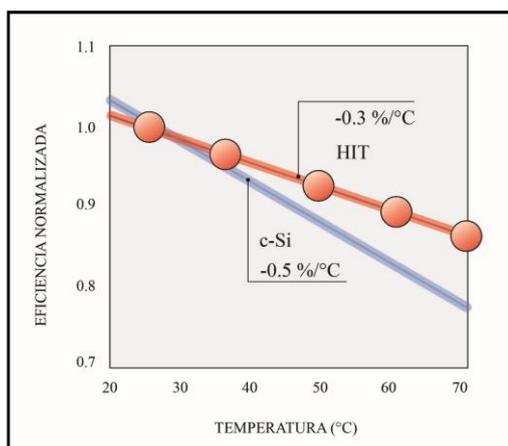
**Fig. 9.** a) Estructura de una celda común. b) Estructura de una celda tipo HIT.

Las celdas HIT aprovechan la combinación de las prestaciones del silicio monocristalino y amorfo en lo que refiere a la insolación solar directa e indirecta.

#### 4.2 Coeficiente de temperatura

El coeficiente de temperatura de una celda común define la degradación de las prestaciones de conversión energética en función del crecimiento de la temperatura de trabajo de la celda.

En módulos con celdas comunes de silicio cristalino por lo general el coeficiente de temperatura de la máxima potencia se aproxima a  $-0,5 \text{ \% } / ^\circ\text{C}$ . Por otra parte, en módulos con celdas HIT este coeficiente se aproxima a  $-0,3 \text{ \% } / ^\circ\text{C}$ .



**Fig. 10.** Rectas cuyas pendientes muestran los coeficientes de temperatura de dos tipos de celdas solares.

### 4.3 Superficies antirreflejos

Las buenas prestaciones de una celda HIT durante la insolación solar, sea en condiciones de irradiación directa (con cielo despejado) o de irradiación difusa (cielo nublado) o en general en condiciones de baja irradiación se deben a la presencia del silicio amorfo, de un vidrio antirreflejo de alta transmitancia y de un particular tratamiento de la superficie de la celda.

Los módulos con revestimiento antirreflejo logran un 1,7% más de energía respecto de aquellos módulos sin revestimiento. Esto se debe principalmente a los pequeños ángulos de incidencia de los rayos solares en las primeras y últimas horas del día donde el revestimiento tiene un efecto positivo como se muestra en la fig. 11.

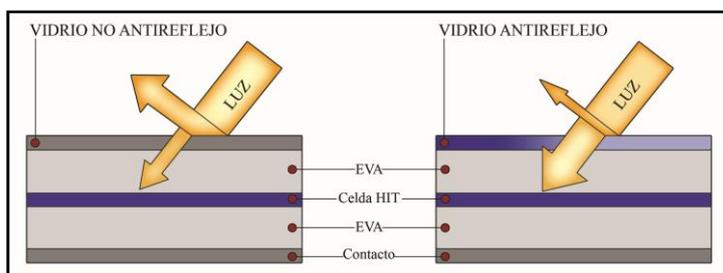


Fig. 11. Trayectorias de los rayos solares en un la superficie de módulo sin/con revestimiento antirreflejo solar.

Se puede corroer la textura de la superficie del silicio con soluciones alcalinas formando pirámides de bases cuadradas en posiciones aleatorias y cuyas profundidades en el orden de las micras pueden ser controlados en función de la temperatura y el tiempo en que se realiza la corrosión. Esta textura superficial de la celda HIT hace que la luz se refleje de una pirámide a otra aumentando así el absorbimiento como se muestra en la fig. 12 [8].

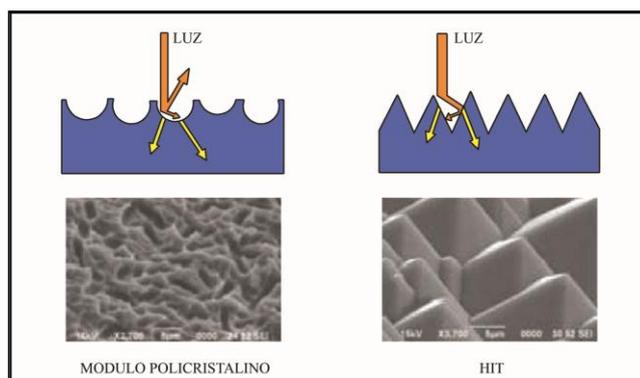


Fig. 12. Comportamiento de los rayos solares en la superficie de celda de un módulo policristalino y de un HIT

## Conclusiones

Las prestaciones una celda solar no solamente se ven mermadas por el material utilizado, sino por las condiciones ambientales, inclinación, la ubicación geográfica. Ellas no producen una energía constante según la potencia nominal de fábrica ya que estas condiciones expuestas hacen cambiar el punto de máxima potencia de producción. Ecuador es privilegiado por tener algunos lugares con muy buena insolación solar anual, no obstante en el dimensionamiento para una instalación de paneles solares habrá que utilizar celdas con una buena respuesta a las altas temperaturas de trabajo, celdas del tipo HIT serían recomendables.

La eficiencia de una celda solar es baja debido principalmente a las características semiconductoras del silicio y su interacción con los fotones de la luz solar. Por otra parte, se han realizado estudios con celdas de arseniuro de galio (GaAs) cuyo rendimiento teórico llega hasta el 28%, pero estas sustancias no son abundante en la naturaleza.

Notamos que las celdas HIT logran hasta un 19% de eficiencia en la conversión energética con ayuda de las finas capas del silicio amorfo, del revestimiento antirreflejo del módulo y del tratamiento de corrosión de la superficie de la celda. No obstante, sigue siendo baja la eficiencia en comparación de sistemas energéticos tradicionales.

Actualmente se está investigando como mejorar esta eficiencia pero por una vía distinta del silicio, es el caso del grafeno en las que recientemente se ha publicado una investigación en Nature Physics dando a conocer que un singular fotón que incide en la superficie del grafeno se generan múltiples electrones lo que no ocurre con otros materiales. El grafeno podría ser potencialmente utilizado en las celdas fotovoltaicas y mejorar las bajas eficiencias actuales [9].

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado durante el primer semestre del Master de Eficiencia Energética y Fuentes de Energías Renovables en su VIII edición en la Universidad de Roma “La Sapienza”.

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dra. Silvia Sangiorgio quien ha coordinado las actividades académicas del master.

## Referencias

1. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, [www.oecd.org](http://www.oecd.org)
2. Revista enfocada a energías renovables de Italia y el mundo, [www.qualenergia.it](http://www.qualenergia.it)
3. Efecto fotoeléctrico, [www.physics.info](http://www.physics.info)
4. Módulos fotovoltaicos, <http://www.conergy.it/>
5. Imágenes con instrumentos científicos, <http://www.imagesco.com/>

6. Guan Hong Guai, Qun Liang Song, Chun Xian Guo, Zhi Song Lu, Tao Chen, Chee Mang Ng, Chang Ming Li, “*Graphene-Pt/ITO counter electrode to significantly reduce Pt loading and enhance charge transfer for high performance dye-sensitized solar cell*”, *Solar Energy*, Volume 86, Issue 7, July 2012, Pages 2041-2048
7. Alcor, E.: *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Promotora General de Estudios, S.A., 2008
8. Pizzini, F.: *Prestaciones tecnológicas entre módulos fotovoltaicos de distinto fabricante*, Roma, 21 Feb. 2013
9. K. J. Tielrooij, J. C. W. Song, S. A. Jensen, A. Centeno, A. Pesquera, A. Zurutuza Elorza, M. Bonn, L. S. Levitov & F. H. L. Koppens, “*Photoexcitation cascade and multiple hot-carrier generation in graphene*”, *Nature Physics*, Published online: February 2013.