

Master en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008

Módulo: Gestión Eficiente de la Energía

FUNDAMENTOS DE LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA: LA CÉLULA SOLAR

AUTOR: JOSÉ L^o BALENZATEGUI MANZANARES

FUNDAMENTOS DE LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA

José L° Balenzategui Manzanares
CIEMAT

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata de presentar los principios de funcionamiento de las células solares o células fotovoltaicas, los dispositivos empleados para realizar una *conversión fotovoltaica* de la radiación solar. El fundamento de conversión de la radiación solar en electricidad es bien distinto entre las tecnologías fotovoltaica (FV) y térmica, dos de las grandes protagonistas de este Master, aunque la energía FV comparte con su ‘prima’ térmica algunos de los conceptos teóricos y de las soluciones técnicas empleadas (materiales, dispositivos ópticos, sistemas de seguimiento, etc). Así, mientras las tecnologías térmicas utilizan el *calor* como fuente primaria de energía, las tecnologías fotovoltaicas requieren de la *luz* como materia prima. Esta distinción entre *luz* y *calor* es evidentemente absurda por cuanto ambos conceptos conforman de forma inseparable la propia esencia de la radiación solar y de la energía que transporta, pero sirve en este primer acercamiento para diferenciarlas. Además, mientras en los sistemas térmicos se utiliza un fluido como material absorbente intermedio en un proceso en, al menos, tres etapas (captación, absorción, transformación), los sistemas fotovoltaicos emplean como medio material un compuesto semiconductor que transforma la radiación en electricidad en un proceso en una sola etapa (absorción-conversión) o, como mucho, en dos etapas (captación y absorción-conversión, en el caso de los sistemas FV de concentración). Existen muchas otras diferencias en cuanto a sus características de funcionamiento. Por ejemplo, un incremento de temperatura en un sistema fotovoltaico afecta negativamente al rendimiento de conversión, al contrario que en los sistemas térmicos. Todos estos detalles los iremos analizando en el presente documento.

Hemos de señalar que las tecnologías fotovoltaicas son relativamente jóvenes en cuanto a su desarrollo tecnológico. Ciertamente es que el efecto fotovoltaico se conoce desde finales del siglo XIX (en la época en la que los primeros ingenios solares térmicos estaban ya probándose) pero no fue hasta la década de los 50 del siglo XX cuando se consiguieron realizar las primeras células con eficiencias de conversión apreciables [Perlin, 2002]. El nacimiento y desarrollo de las tecnologías fotovoltaicas estuvieron inicialmente ligados a la historia de la radio, las telecomunicaciones, la electrónica y los viajes espaciales. Es a partir de la década de los 70, coincidiendo con la primera gran crisis energética internacional, cuando la energía fotovoltaica (FV) empieza a investigarse y a desarrollarse como una fuente de energía *per se* con un enorme atractivo por sus características y sus potenciales aplicaciones. La energía FV supone actualmente un campo de desarrollo científico y tecnológico de enorme amplitud y gran actividad al que, desde aquí, vamos simplemente a introducirnos de forma muy somera.

Comenzaremos en este tema por exponer de forma simple cuál es el fundamento de la conversión fotovoltaica y las propiedades de los materiales semiconductores que los hacen susceptibles de ser utilizados en esta conversión. Estudiaremos también cuáles son la estructura y características de las células solares convencionales, las que trabajan en tecnologías llamadas de *panel plano*. Analizaremos asimismo sus principales parámetros de diseño y las principales influencias que determinan el rendimiento final de estos dispositivos.

2. CONCEPTOS ELEMENTALES DE LA TEORÍA DE SEMICONDUCTORES

Una célula solar fotovoltaica es un dispositivo electrónico de estado sólido capaz de convertir de forma directa la radiación solar en energía eléctrica. Aunque su funcionamiento es muy distinto, podemos pensar inicialmente que una célula solar se comporta, cuando recibe la radiación solar, de forma similar a una pequeña pila o batería (de las que utilizamos en nuestros radios, por ejemplo) que es capaz de suministrar una cierta cantidad de corriente mientras mantiene entre sus bornes una

diferencia de potencial determinada. La energía eléctrica producida se suministra en forma de una corriente eléctrica continua (DC) a una carga externa conectada mediante un circuito a uno o varios grupos de células que se ensamblan en unidades compactas que denominamos *módulos fotovoltaicos*. Al igual que hacemos con las pilas, las células que constituyen un módulo se asocian entre sí mediante conexiones en serie y en paralelo hasta alcanzar los niveles de corriente y tensión adecuados.

El efecto fotovoltaico está basado en la propiedad que tienen los materiales semiconductores de aumentar la densidad de electrones *libres* bajo ciertos estímulos externos como, por ejemplo, cuando se eleva su temperatura o cuando se les ilumina. En este último caso, la energía de los fotones incidentes sobre el semiconductor es absorbida por los electrones de valencia, que pueden romper el enlace con sus átomos y quedan libres para desplazarse en el seno del material. La densidad de electrones libres (a los que nos referiremos simplemente como electrones) creados por la absorción de la luz incidente representa una población *en exceso* respecto a la concentración existente en equilibrio térmico, siendo ésta última estable y característica a una temperatura dada.

La ausencia de un electrón en el enlace atómico roto se denomina *hueco*, y su comportamiento se asimila al de una partícula de carga positiva, que puede desplazarse de un átomo a otro en el seno de la red cristalina. Las propiedades de conducción eléctrica de un material semiconductor deben entenderse como debidas a la contribución de ambos tipos de cargas (electrones y huecos), aspecto que los diferencia respecto al comportamiento de materiales conductores y aislantes. A electrones y huecos se le engloba normalmente con la denominación más genérica de *portadores* de carga. Es importante observar que la concentración de electrones y de huecos en un material puro o *intrínseco* será la misma, puesto que ambos tipos de portadores se crean simultáneamente, en el mismo instante.

Podemos visualizar el proceso de absorción y la creación de electrones y huecos *a pares*, mediante algunos modelos simples pero que resultan muy útiles para su comprensión. En la Figura 1 se han ilustrado los procesos que acabamos de mencionar en un modelo de *bandas de energía*. En este modelo, los niveles de energía permitidos para los electrones más alejados del núcleo atómico (electrones de *valencia*) de los átomos que conforman una red cristalina se agrupan en dos rangos o *bandas* de energía. El rango o banda inferior de estados permitidos se denomina *banda de valencia* y representa el conjunto de valores energéticos posibles para electrones de valencia que aún permanecen ligados a los átomos de la red. La banda superior se denomina *banda de conducción* y engloba los valores de energía posibles para electrones que han roto su enlace y pueden moverse libremente en el seno del material. Ambas bandas aparecen separadas entre sí por un intervalo que representa la cantidad de energía necesaria para que un electrón de valencia pueda romper el enlace. Este salto energético se llama *banda prohibida* o *gap de energía*, E_G , y su anchura es característica de cada material semiconductor (ejemplo: $E_G = 1,12$ eV para el Si; $0,66$ eV para el Ge; $1,42$ eV para el GaAs).

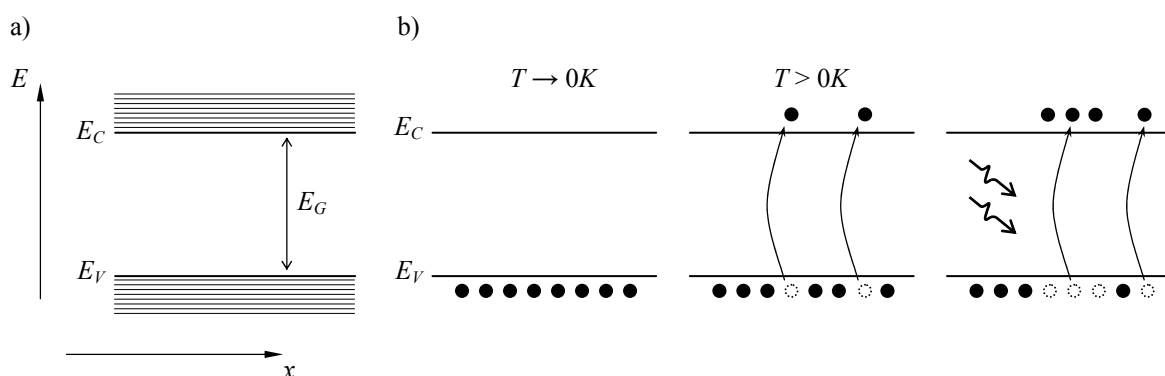


Figura 1. a) Estructura de bandas en un semiconductor: el nivel energético inferior de la banda de conducción, E_C , y el nivel energético superior de la banda de valencia, E_V , están separados por un gap de energía E_G , característico de cada semiconductor; b) generación de electrones y huecos. Cerca del cero absoluto de temperatura, los electrones de valencia están atrapados en sus átomos. Al incrementarse la temperatura, algunos electrones adquieren suficiente energía para romper los enlaces y promocionar a la banda de conducción. Los electrones de valencia también pueden liberarse si el dispositivo es iluminado con fotones con energía $E > E_G$.

Las propiedades ópticas, electrónicas y de conducción de un material semiconductor están relacionadas precisamente con la existencia de esa banda prohibida de energía. Por ejemplo, el valor

del gap de energía E_G , se reduce con la temperatura y provoca, entre otras cosas, que la densidad de portadores en equilibrio en un material intrínseco aumente notablemente al incrementarse la temperatura, puesto que entre ambos existe una dependencia en la forma:

$$n_i^2 \sim \exp \frac{-E_G}{kT} \quad (1)$$

siendo k la constante de Boltzmann y T la temperatura absoluta. Ambas dependencias se han representado en la Figura 2.

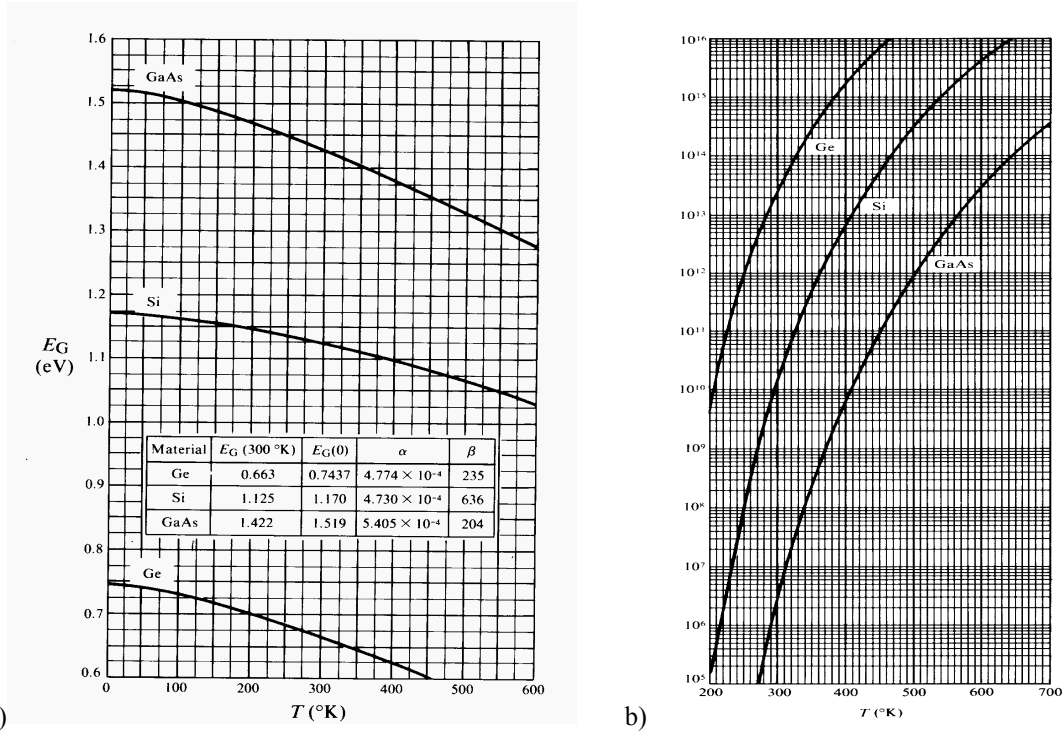


Figura 2. Variación con la temperatura de a) el gap de energía E_G característico de varios semiconductores, y b) la concentración intrínseca de portadores en estos materiales.

Estas propiedades opto-electrónicas, junto a los procesos dinámicos por los cuales los pares e^-/h^+ se crean (procesos de *generación*) y se destruyen o aniquilan (procesos de *recombinación*), determinan en primera instancia el funcionamiento de la célula fotovoltaica en distintas condiciones de operación. La absorción de la radiación solar es sólo uno de los diversos procesos de generación que pueden tener lugar en el seno o en las fronteras de un dispositivo semiconductor, como comentaremos más adelante. De hecho, cada mecanismo de generación o producción de portadores lleva asociado un proceso inverso de recombinación. Los diversos procesos pueden tener mayor o menor importancia en un dispositivo dado: algunos son inherentes a la propia naturaleza del material, otros dependen de la calidad de la red cristalina y la densidad de defectos que aparecen en ella. Lo más importante es observar que, de no introducir artificialmente alguna forma que permita extraer los electrones, una lámina de material semiconductor no es capaz de producir por sí misma una corriente eléctrica. En ausencia de otras perturbaciones, la densidad de portadores es alta cuando se ilumina la lámina y se reduce rápidamente (mediante procesos de recombinación) a su valor de equilibrio cuando cesa la iluminación.

En la mayoría de los casos, el artificio que se utiliza para poder extraer electrones de un semiconductor y conseguir que este trabaje como una célula fotovoltaica es la creación de un *campo eléctrico interno* que tiene un carácter superficial y permanente en la estructura del dispositivo. Es bien sabido que, bajo la acción de un campo eléctrico, cualquier elemento de carga experimenta una fuerza de arrastre: $\vec{F} = q\vec{E}$, de forma que las partículas con carga positiva son impelidas en la dirección del campo mientras que las cargas negativas son empujadas en sentido contrario.

Para crear este campo eléctrico en la estructura del dispositivo, se introduce en el semiconductor una cierta cantidad controlada de *impurezas* (llamados *dopantes*), es decir, átomos de otro elemento distinto al material de partida que presenta un exceso o un defecto de electrones en sus

capas más externas respecto al material *intrínseco* (libre de impurezas). Una impureza se considera *donadora* cuando el elemento utilizado tiene un electrón de valencia más que el material intrínseco (caso de dopantes como el P, As o Sb añadidos al Si). La impureza se considera *aceptora* cuando el dopante tiene un electrón de valencia menos que el semiconductor intrínseco (caso del B, Ga, In, o Al agregados al Si). Lo esencial del proceso de dopaje es que la presencia de estas impurezas en cantidad suficiente modifica notablemente la concentración de portadores en el semiconductor en un rango de temperaturas muy amplio, tal como muestra la Figura 3, debido a que las impurezas introducidas se ionizan muy fácilmente a temperaturas relativamente bajas. El semiconductor así dopado se denomina *extrínseco* para indicar que su densidad de portadores está alterada respecto a su concentración inicial. Obsérvese que introducir impurezas aceptoras supone un incremento en la concentración de huecos en el material mientras que impurezas donadoras provocan un aumento en la concentración de electrones. Cuando el material extrínseco ha ganado electrones, se dice que es de tipo negativo o de *tipo-n*. Si ha aumentado su densidad de huecos se dice que es de tipo positivo o *tipo-p*.

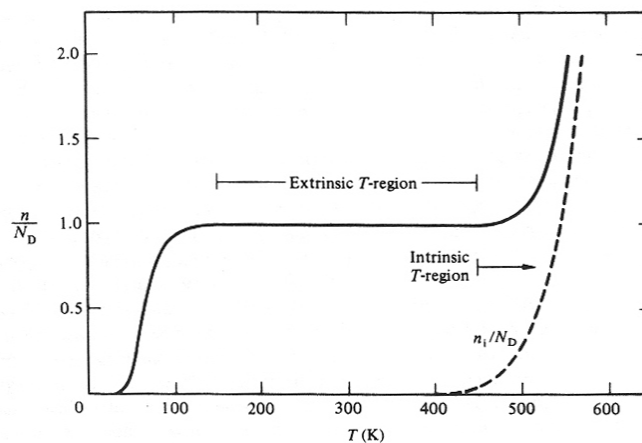


Figura 3. Variación de la concentración relativa de electrones con la temperatura en un material dopado con impurezas donadoras. Sólo a temperaturas muy elevadas, se recupera el comportamiento exponencial de la concentración intrínseca mostrada en la Figura 2.

Durante el proceso de fabricación de una célula, se provoca que impurezas donadoras y aceptoras estén presentes en caras opuestas del dispositivo. A temperatura ambiente, estos dopantes están excitados (aumentando la concentración de electrones y huecos en la región donde se encuentran). Hemos conseguido entonces que una parte del dispositivo sea de tipo-p mientras la parte opuesta lo sea de tipo-n. Pero, al excitarse las impurezas, quedan iones fijos en la red cristalina (los átomos que han cedido y/o ganado electrones). La región o frontera que delimita la zona de tipo-p y la zona de tipo-n está caracterizada entonces por la presencia de iones fijos con carga eléctrica de signo opuesto, lo que provoca la existencia de un campo eléctrico permanente (y de su correspondiente diferencia de potencial). Este tipo de estructura se denomina *unión p-n* (positiva-negativa) y es característica de dispositivos como los diodos electrónicos. El aspecto particular de los diodos es la propiedad *rectificante* de la unión p-n, esto es, que permite el paso de una corriente eléctrica en un sentido (sin apenas caídas de tensión) mientras que presenta una elevada resistencia a la conducción en sentido contrario.

Cuando se ilumina la célula, este campo eléctrico arrastra a los electrones y los huecos fotogenerados en direcciones opuestas y permite la creación de una corriente eléctrica que puede aprovecharse en un circuito externo. Junto a esta *corriente de arrastre* (provocada por el campo eléctrico) existe otra corriente producida por *mecanismos de difusión*. La difusión se produce cuando existe una diferencia en la concentración de partículas (n° de partículas por cm^3) entre dos regiones de un sistema. La corriente neta en la unión p-n y en la célula resulta del balance de estas dos corrientes y de las tasas de recombinación y de generación de portadores (n° de eventos producidos por cm^3 y por segundo) en cada punto del dispositivo.

El efecto fotovoltaico consiste, por tanto, en la conjunción de dos procesos que ocurren en el dispositivo: la fotogeneración de portadores (es decir, la absorción de radiación luminosa en el semiconductor) y el desplazamiento de estos portadores hacia los extremos del dispositivo donde

pueden ser recolectados. En principio, y de una forma más general, el efecto fotovoltaico es susceptible de producirse en cualquier material semiconductor que forma parte de un sistema heterogéneo, tal como estructuras de unión p-n en semiconductores o contactos metal-semiconductor, metal-aislante-semiconductor o semiconductor-electrolito. Sin embargo, la base (~99%) de la tecnología actual tanto a nivel comercial como a nivel experimental o de laboratorio, la forman los dispositivos de unión en semiconductores,

Para coleccionar los portadores de carga a ese circuito externo, se hace necesario dotar a la célula de una serie de contactos metálicos que sirvan de conexión entre el semiconductor y el conductor eléctrico. Los contactos deben permitir extraer de la forma lo más eficiente posible electrones por una de sus caras y devolverlos a la célula por la cara opuesta. Pero, al mismo tiempo, la célula fotovoltaica debe ser capaz de captar la mayor cantidad posible de luz para realizar esta conversión sin que la presencia de esos contactos metálicos suponga una merma significativa en el proceso de absorción. Así pues, la estructura del campo eléctrico interno y su proceso de fabricación, la forma y constituyentes de las metalizaciones o contactos eléctricos y el diseño óptico de la célula determinan finalmente su rendimiento de conversión.

3. LA CÉLULA SOLAR. ESTRUCTURA Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Con las nociones básicas introducidas hasta el momento, podemos comenzar a describir cuál es la estructura y el funcionamiento básico de una célula solar. También nos ocuparemos brevemente de señalar cuáles son sus parámetros característicos de funcionamiento.

3.1. Estructura de una célula fotovoltaica

La estructura simplificada de una célula fotovoltaica se muestra en la Figura 4 y en ella podemos apreciar los principales elementos o secciones que la conforman. Desde el punto de vista de los fotones incidentes, comenzando por su cara anterior, encontramos por este orden:

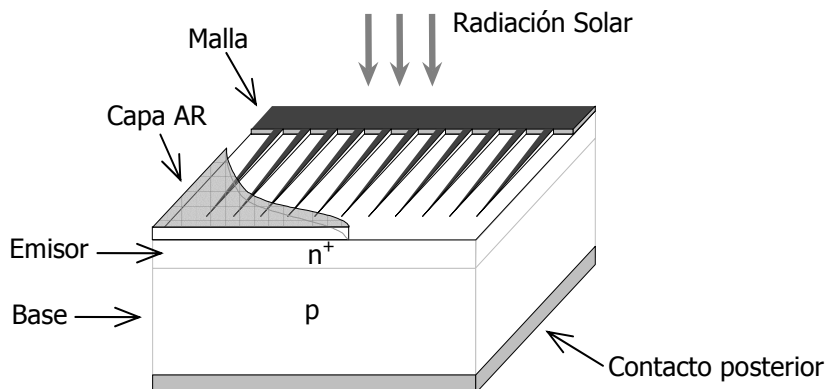


Figura 4. Estructura simplificada de una célula fotovoltaica de unión p-n. Las dimensiones relativas de cada elemento se han exagerado para una mejor visualización.

- una capa antirreflexiva (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. El espesor y el índice de refracción de esta capa (puede ser una capa compuesta de varias) se diseñan de forma que la reflectancia sea mínima a cierta longitud de onda y en un intervalo lo más amplio posible del espectro. Además de estas capas, muchas células presentan superficies dotadas de surcos, micro-pirámides y otras texturas creadas para reducir aún más las pérdidas por reflexión.
- Una malla de metalización, representada en forma de peine en la **Figura 4**, pero que puede presentar formas diversas. El diseño de esta malla de metalización es crítico puesto que debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo. Su parámetro más característico es el *factor de sombra*, F_s ,

que mide la cantidad de superficie ocupada por los dedos metálicos respecto al área total del dispositivo.

- Las capas activas de material semiconductor, en el que distinguimos entre las dos regiones que forman la unión p-n (denominadas *emisor* y *base*). Habitualmente, estas capas activas aparecen depositadas o crecidas sobre un sustrato más grueso que confiere mayor resistencia mecánica al conjunto. Además del tipo y la calidad del semiconductor empleados, el espesor de las capas (emisor y base) y la densidad o concentración de impurezas influyen notablemente en el rendimiento final del dispositivo.
- El contacto metálico posterior, que suele realizarse metalizando toda la superficie del dispositivo cuando no existe el requisito de que ésta reciba luz por su parte posterior.

A partir de esta estructura básica, se han introducido en la estructura de la célula numerosas modificaciones e innovaciones con el fin de conseguir mayores eficiencias de conversión. Por ejemplo, como en el caso de algunas células de concentración o algunas realizadas con tecnologías de lámina delgada, dispositivos más sofisticados pueden presentar más de una unión en su estructura (dispositivos *tandem* o *multiunión*), o una o varias uniones p-n formadas por distintos materiales semiconductores (dispositivos de *heterounión*). Aparecen además capas adicionales para mejorar el crecimiento de las secciones activas sobre un sustrato, acoplar constantes de red entre distintos materiales, permitir el crecimiento de unas células sobre otras, transferir portadores de carga de una a otra sección sin pérdidas, etc.

3.2. Parámetros característicos

Cuando se ilumina un dispositivo como el de la Figura 4 mientras está conectado a una carga externa, éste funciona como generador de energía y exhibe unos valores de corriente y tensión que son variables en función de las condiciones de operación (temperatura, irradiancia) y del punto de trabajo que impone la carga. La curva característica de una célula solar operando en *CEM* (o *Condiciones Estándar de Medida*, definidas por 1000 W/m² de irradiancia con distribución espectral AM1.5G y 25°C de temperatura) tiene la forma aproximada que se muestra en la Figura 5 y responde a una ecuación ideal conocida como el *modelo de una exponencial* de la célula. Esta ecuación está basada en considerar como válido el *principio de superposición*, según el cual, la corriente de la célula resulta del balance de la corriente producida por la luz incidente y la correspondiente al diodo de unión p-n que forma su núcleo:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

donde I_L es la corriente fotogenerada e I_D es la corriente de oscuridad o corriente de diodo. En la expresión de ésta última, I_0 se denomina *corriente inversa de saturación* del diodo, q es la carga del electrón, m es el llamado *factor de idealidad* del diodo (un parámetro adimensional con valores típicos entre 1 y 2), k es la cte. de Boltzmann, y T es la temperatura absoluta. Al término kT/q se le llama habitualmente *voltaje térmico*.

En la Figura 5 se han señalado además tres parámetros fundamentales para describir el comportamiento del dispositivo:

- La *corriente de cortocircuito* (I_{SC}) es el mayor valor de la corriente que puede obtenerse del dispositivo como generador, y que se produce cuando $V = 0$. En ese caso, y según (2):

$$I_{SC} \equiv I(V = 0) = I_L \quad (3)$$

- La *tensión de circuito abierto* (V_{OC}) es la mayor tensión que polariza el dispositivo cuando trabaja como generador, dada para $I = 0$. Aplicando esta condición en (2):

$$V_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (4)$$

- El *punto de máxima potencia* (P_M) es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por la célula a la carga externa es máxima. Para una carga resistiva, la potencia P entregada viene dada por el producto: $P = V \cdot I$, y es la que se ha representado en la la Figura 5. El punto de trabajo correspondiente, (V_M, I_M) , define los valores nominales de la tensión y la corriente en

el punto de máxima potencia (no confundir con tensión y corriente *máximas*), de forma que:
 $P_M = V_M \cdot I_M$.

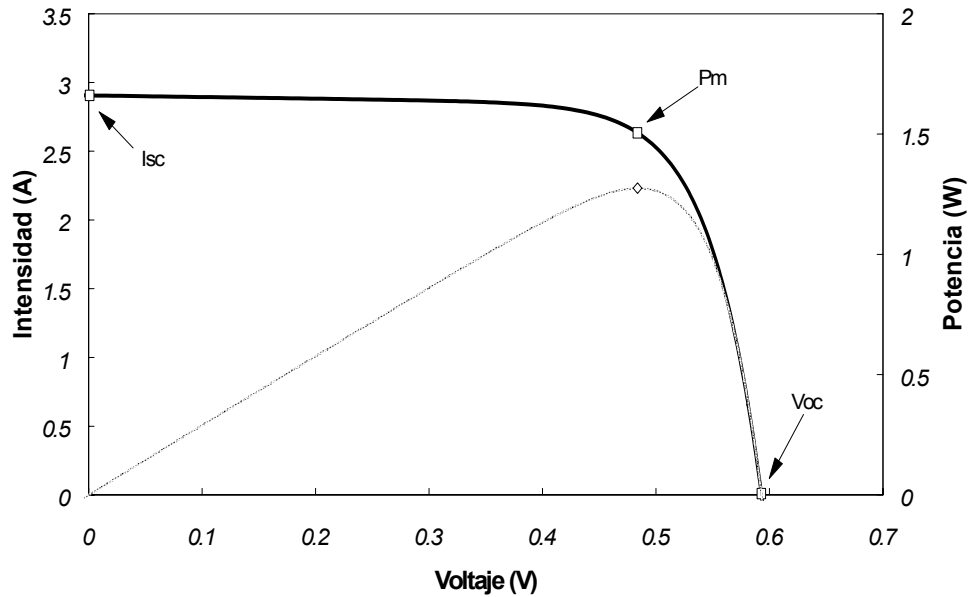


Figura 5. Curva característica I-V de una célula fotovoltaica en iluminación, con indicación de algunos de sus parámetros principales. La curva punteada representa la potencia P(V).

Junto a estos parámetros de operación, existen otros dos de enorme importancia:

- El *factor de forma* (FF) es la relación entre la potencia máxima (o el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto entre I_{SC} y V_{OC} :

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC} V_{OC}} = \frac{I_M V_M}{I_{SC} V_{OC}} \quad (5)$$

y se usa para cuantificar la forma de la curva característica. Aunque en la práctica es siempre menor que la unidad, su valor es más alto cuando el codo de la curva es más prominente o agudo. Por lo general, un valor bajo de FF está asociado con la existencias de pérdidas en el dispositivo mientras que una célula de buena calidad suele tener valores de FF elevados ($FF > 0.70$).

- La *eficiencia de conversión energética* (η), expresada como un porcentaje, viene dada por la relación entre la potencia eléctrica que puede entregar la célula y la potencia P_L de la radiación que incide sobre ella:

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_M V_M}{P_L} = \frac{FF \cdot I_{SC} V_{OC}}{P_L} \quad (6)$$

Como indicación de carácter general, puede apreciarse cómo un aumento de la corriente de cortocircuito I_{SC} y/o de la tensión de circuito abierto V_{OC} de la célula conducen (siempre que no se perjudiquen otros parámetros de funcionamiento) a una mayor eficiencia del dispositivo.

4. ASPECTOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Además de los aspectos ya señalados, existen algunas propiedades fundamentales de las células o de los semiconductores que las constituyen sobre las que es necesario comentar algunos detalles para comprender mejor su funcionamiento.

4.1. Propiedades opto-electrónicas de las células

En primer lugar, hemos aludido a la capacidad del semiconductor de absorber de forma eficiente los fotones incidentes sobre su superficie. En principio, esto es cierto para aquellos fotones que tienen una energía E igual o superior al gap de energía E_G del material. Aquellos fotones con energía $E < E_G$ no son absorbidos y pueden atravesar el dispositivo como si este fuera transparente (excepto si existen mecanismos de absorción adicionales que no provocan la generación de electrones y huecos). Cada material semiconductor está caracterizado por un valor particular de la energía de la banda prohibida, que nos indica la energía mínima (o la longitud de onda máxima) de la radiación que es capaz de absorber. El valor de E_G del material determina además el límite superior teórico para la tensión de circuito abierto V_{OC} de una célula basada en dicho material. Los fotones con energía sensiblemente superior al valor de E_G se absorben apenas con unas décimas de micras de material, y la energía en exceso se pierde rápidamente por choques de los electrones libres con los iones de la red (proceso de *termalización*), siendo este un mecanismo de pérdidas inevitable (excepto para conceptos de célula muy avanzados, actualmente en fase de investigación).

Pero además, cada semiconductor presenta una capacidad de absorción diferente para fotones de distintas energías, que se mide mediante su *coeficiente de absorción*, $\alpha(\lambda)$. Este coeficiente nos indica la cantidad de fotones que se absorben por unidad de longitud de material atravesado por la radiación a cada longitud de onda, λ . En la Figura 6 se muestran los coeficientes $\alpha(\lambda)$ de distintos semiconductores. Algunos materiales son muy absorbentes y permiten que las capas activas que conforman la célula sean muy delgadas (del orden de algunas micras, como en el GaAs) mientras que otros materiales requieren de mayores espesores al tener coeficientes de absorción más bajos (caso del Si cristalino, por ejemplo).

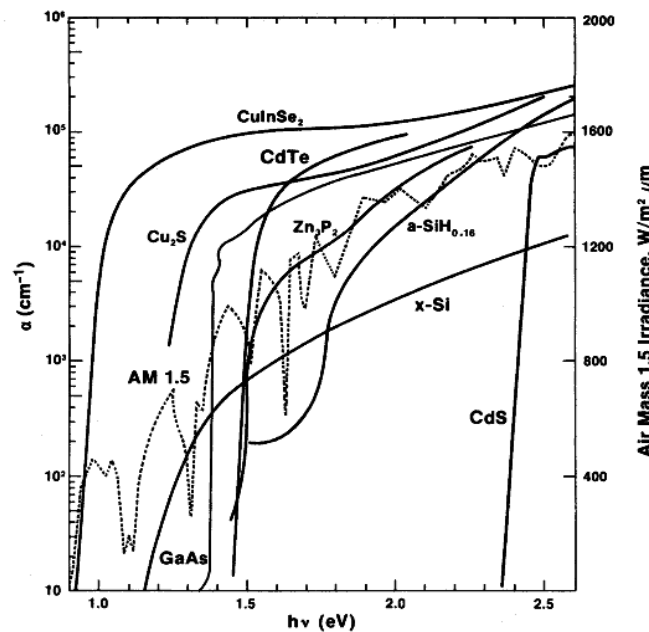


Figura 6. Coeficiente de absorción α en función de la energía para distintos materiales fotovoltaicos. La línea punteada muestra la distribución espectral AM1.5 como referencia.

Por otro lado, no sólo es necesario que el material sea capaz de absorber fotones y producir pares e^-/h^+ sino que estos portadores de carga deben extraerse de la célula para verter la energía en el circuito externo. La fracción de portadores que es finalmente extraída del dispositivo se denomina *eficiencia de colección*, η_C , y depende de las propiedades electro-ópticas del material y de la estructura de la célula. En la práctica, no es inmediato conseguir valores de η_C próximos a la unidad para todas las longitudes de onda, puesto que una parte de los portadores fotogenerados se recombinan antes de poder alcanzar la zona del campo eléctrico o los contactos metálicos, a través de diversos mecanismos (procesos radiativos, Shockley-Read-Hall, Auger, recombinación superficial [Pierret, 1989]). Por ejemplo, el valor de I_0 , la corriente inversa de saturación del diodo, está directamente relacionado con el grado de recombinación en la célula. Obsérvese también que en la ecuación (2), la corriente del diodo I_D representa en esencia la recombinación inducida en el dispositivo y que ésta depende exponencialmente de la tensión de operación V , por lo que a mayor tensión, mayor recombinación y,

por tanto, mayores pérdidas y menor corriente. Precisamente la tensión de circuito abierto V_{OC} corresponde a la situación en la que el número de procesos de recombinación iguala al número de procesos de generación, lo que impide que circule corriente al exterior del dispositivo. Incluso en condiciones de cortocircuito ($V = 0$), los procesos de recombinación no se anulan enteramente.

4.2. Mecanismos adicionales de pérdidas y la ecuación *real* de la célula

Existen pues diversos mecanismos de pérdidas que es importante conocer y controlar en la medida de lo posible. Además de los procesos de recombinación que hemos mencionado, una de las principales fuentes de pérdidas se debe a la existencia de una *resistencia serie* R_S en el dispositivo. Esta resistencia tiene distintas contribuciones, presenta un carácter distribuido en el dispositivo y, además, no siempre mantiene un valor constante. En primer lugar, el propio material semiconductor ofrece una cierta resistencia al paso de la corriente, por lo que lo ideal sería fabricar células muy delgadas (pero sin que esto suponga reducir la capacidad de absorción, evidentemente). La base y el emisor de la célula suelen presentar distintos valores de R_S debido a las direcciones en que fluyen los portadores y las distintas concentraciones de impurezas. Los contactos entre metal y semiconductor también introducen caídas resistivas, por lo que se tiende a dopar en mayor proporción las zonas de contacto. Y finalmente, la propia malla de metalización frontal es uno de los principales contribuyentes. Una malla de metalización excesivamente fina (pequeña sección de conductor) introduce caídas resistivas grandes aunque permite una mejor captación de radiación. Por el contrario, reducir su resistencia serie implica utilizar dedos de metalización más gruesos a costa de aumentar el factor de sombra y reducir la eficiencia de la célula. De ahí lo importante de su diseño.

Por otro lado, existen también una serie de fugas de corriente adicionales que pueden producirse por diversas causas [Araújo, 1995] (imperfecciones de la unión p-n o defectos en la estructura cristalina como dislocaciones, fronteras de grano, etc, por conducción por la superficie de los bordes de la célula o por pequeños cortocircuitos locales). Estas fugas de corriente suelen caracterizarse como una resistencia en paralelo R_P con el dispositivo. Sin embargo, esta resistencia R_P suele tener un valor equivalente muy elevado y no tiene apenas importancia en el funcionamiento normal de muchos tipos de células y menos si operan bajo luz concentrada.

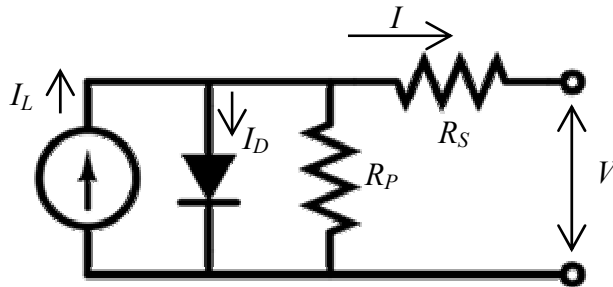


Figura 7. Circuito equivalente de una célula solar *real*, con incorporación de las resistencias serie y paralelo.

La incorporación de todos estos efectos mediante elementos discretos de un circuito (resistencias) hace que podamos representar un *circuito equivalente* de una célula fotovoltaica (ver Figura 7) y que podamos introducir una ecuación *real* de la célula que incorpore las pérdidas de corriente asociadas, en la forma:

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{mkT} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (7)$$

Así, una célula de alta eficiencia presentará, en general, valores muy bajos de resistencia serie mientras que los valores de resistencia paralelo serán muy elevados. La resistencia serie, como vamos a comprobar más adelante, es una de las principales causas de la reducción de la eficiencia de una célula, sobre todo cuando se aumenta el nivel de concentración.

4.3. Influencia de la irradiancia y la temperatura

Una forma de caracterizar o diagnosticar si la célula está recolectando adecuadamente fotones

de distintas longitudes de onda es mediante la medida de la *eficiencia cuántica* del dispositivo. La eficiencia cuántica $Q_E(\lambda)$ es el cociente entre el número de electrones extraídos del dispositivo (con la célula en cortocircuito) y el número de fotones incidente sobre el mismo para cada valor de λ . A partir de lo ya comentado, es fácil comprender que:

$$Q_E(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot \eta_c(\lambda) \quad (8)$$

Habitualmente, la eficiencia cuántica se calcula de forma simultánea a la *respuesta espectral* $S_R(\lambda)$ del dispositivo, que expresa el mismo concepto en términos de corriente extraída de la célula por unidad de potencia luminosa incidente. Así, ambas están relacionadas por:

$$S_R(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} Q_E(\lambda) \quad (9)$$

siendo h la constante de Planck y c la velocidad de la luz.

La respuesta espectral de células basadas en distintos materiales se muestra en la Figura 8. Ambas magnitudes, S_R y Q_E , permiten identificar problemas y defectos en la célula y además dónde se están produciendo, hasta el punto de que se consideran como la *huella dactilar* de la célula [Martí, 2000]. También son importantes en la calibración y en la medida de las propiedades de la célula trabajando bajo distintos espectros, puesto que la corriente fotogenerada viene dada por:

$$I_L = A \int_0^\infty S_R(\lambda) G(\lambda) d\lambda \equiv eA \int_0^\infty Q_E(\lambda) G(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (10)$$

siendo $G(\lambda)$ la distribución espectral de la radiación incidente y A el área del dispositivo. Observe que, a partir de (7), un dispositivo fotovoltaico de buena calidad (con valores adecuados de las resistencias serie y paralelo), debe cumplir: $I_{SC} \approx I_L$. Por tanto, si consideramos que S_R es constante e invariante con el nivel de irradiancia, la corriente de cortocircuito debe presentar, en un amplio rango de trabajo, una dependencia lineal con la concentración luminosa X , puesto que:

$$I_L(G) = I_L(G_0) \frac{G}{G_0} = X \cdot I_L(G_0) \rightarrow I_{SC}(G) = X \cdot I_{SC}(G_0) \quad (11)$$

siendo G la irradiancia en unas condiciones dadas de trabajo y G_0 un valor de referencia (por ejemplo, las de *STC*, que en el ámbito fotovoltaico se denominan como “1 sol”).

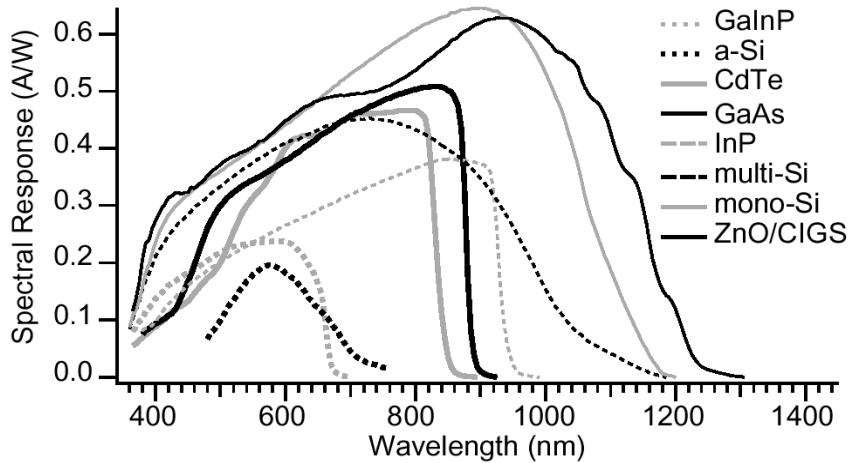


Figura 8. Respuesta espectral de células basadas en distintos materiales fotovoltaicos.

La tensión de circuito abierto muestra, en cambio, una dependencia logarítmica con la concentración luminosa, que puede deducirse a partir de (4):

$$V_{OC}(G) = V_0 + m \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{G}{G_0}\right) = V_0 + m \frac{kT}{q} \ln(X) \quad (12)$$

siendo V_0 el valor de V_{OC} a las condiciones de referencia dadas por G_0 .

Por otro lado, la variación de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto de la célula con la temperatura tiene, además de las dependencias explícitas que aparecen en (4) y (7), otras dependencias implícitas (por ejemplo, a través de la variación del gap del material, o de la corriente

fotogenerada). La principal de estas dependencias se produce por medio del parámetro I_0 , que depende fuertemente de la temperatura:

$$I_0 = K \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \quad (13)$$

siendo K y E_{G0} dos constantes. En la práctica y para un rango amplio de temperaturas de operación, el resultado final es una variación lineal de I_{SC} y V_{OC} con T , que se representa mediante dos coeficientes de temperatura en la forma:

$$\begin{aligned} I_{SC}(T) &= I_{SC}(T_R) + \alpha \cdot (T - T_R) \\ V_{OC}(T) &= V_{OC}(T_R) + \beta \cdot (T - T_R) \end{aligned} \quad (14)$$

donde T_R es una temperatura de referencia. Para niveles medios o altos de irradiancia, el coeficiente α es positivo (no confundirlo con el coeficiente de absorción) mientras que el coeficiente β es negativo, reflejando el hecho de que la I_{SC} aumenta con la temperatura mientras que V_{OC} disminuye al aumentar T (en términos relativos, el aumento de I_{SC} es mucho menos significativo que la reducción de V_{OC}). El factor de forma FF también disminuye ante un incremento de la temperatura, sobre todo debido al incremento de I_0 y a la disminución de la V_{OC} . Como resultado de todas estas dependencias, la eficiencia de una célula fotovoltaica decrece con la temperatura (del orden del 0.5% por grado para el Si, y de 0.3% por grado para el GaAs).

Comprender estas dependencias de los distintos parámetros con la irradiancia y la temperatura, junto con los mecanismos de pérdidas que hemos señalado, es esencial para profundizar en el diseño y funcionamiento de las células fotovoltaicas.

En este documento hemos tratado de introducir los principios de conversión, la estructura básica, los parámetros característicos y los aspectos que condicionan el rendimiento de una célula fotovoltaica en distintas condiciones de operación. En el próximo capítulo podremos comprobar cómo pueden controlarse algunos parámetros de diseño para conseguir células de alta eficiencia y estudiaremos cómo se fabrican y qué particularidades tienen diversos tipos de células fotovoltaicas.

5. REFERENCIAS

- [Araújo, 1995] G.L.Araújo, “La célula Solar”, en E.Lorenzo, “Electricidad Solar”. Progensa (1994)
- [Green, 1998] M.A.Green, “Solar Cells. Operating Principles, Technology and System Applications”. University of New South Wales (1998).
- [Martí, 2000] A. Martí, “Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica: La Célula Solar”, en “Fundamentos, Dimensionado Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica”. CIEMAT, Madrid (2004).
- [Sánchez, 1984] E.Sánchez, G.L.Araújo, “Mathematical Analysis of the Efficiency Concentration Characteristics of a Solar Cell”. Solar Cells 12 (1984) 263-276.
- [Perlin, 2002] J. Perlin, “From Space to Heart: the History of Solar Electricity”. Harvard University Press (2002).
- [Pierret, 1989] R.F.Pierret, “Semiconductor Fundamentals”, en la colección “Modular Series on Solid State Devices”. Addison-Wesley Iberoamericana (1989)