

CELDA SOLAR NO-IDEALES. UNA CARACTERIZACION ELECTROTECNICA.

Mauricio García Castañeda. (*)
Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia.

Introducción.

- Como resultado de los diversos pasos existentes en la fabricación de las celdas solares, uno de los métodos que se emplean para caracterizar la calidad de los dispositivos obtenidos es por medio de las mediciones de sus características corriente-voltaje.

Esta caracterización eléctrica puede poner de manifiesto problemas bien sea de los materiales empleados, así como de los procesos mismos involucrados en la producción de las celdas. En general, la forma misma de la curva corriente voltaje puede presentar desviaciones de un comportamiento denominado ideal, y a partir de tales resultados identificar las causas y eventualmente remediarlas.

Desde un punto de vista electrotécnico, los cambios de la forma de la curva corriente voltaje, y por consiguiente la calidad y la eficiencia de las celdas solares, son responsabilidad de tres factores diferentes: Resistencias en Serie, Resistencias en Paralelo (Shunt) y el denominado Factor de Calidad del Diodo (1).

Ancuando los procesos físicos involucrados en cada uno de los factores anteriormente reseñados pueden ser bastante complejos, en general, se asocian con las siguientes posibilidades.

Un problema de malos contactos entre los electrodos y el "cuerpo" de la celda puede ser identificado con la presencia de resistencias en serie.

Por el contrario, una interconexión deficiente entre los diversos "buses" recolectores de la fotocorriente puede atribuirse a resistencias en paralelo, y finalmente, si la juntura de los materiales semiconductores presenta alta recombinación (sea cual fuera el tipo de portador minoritario), tales problemas se tienen en cuenta en un incremento del denominado factor de calidad del diodo.

En el presente artículo se presentarán algunos resultados numéricos que ponen de manifiesto cada uno de los factores mencionados, sobre las características corriente-voltaje de las celdas solares.

La Celda Solar Ideal.

Al medir la característica eléctrica de una celda solar en oscuro (es decir, sin iluminación), se obtendrá un comportamiento idéntico al de un diodo ordinario. Se reproducirá, entonces, una curva típica de un rectificador eléctrico. Polarizada de una manera conveniente dejará pasar casi sin resistencia la corriente, mientras que polarizada en "reversa" el paso de corriente eléctrica será insignificante, para efectos

prácticos, mientras no se sobrepase un voltaje denominado de ruptura.

Estos resultados no son sorprendentes de manera alguna puesto que, finalmente, en la construcción de una celda solar lo que se realiza es una unión (o heterounión) semiconductor p-n con sus características eléctricas bien conocidas(2).

Cuando se ilumina la celda, por otra parte, y si las condiciones físicas son las apropiadas, se observa un desplazamiento de la corriente en un valor I_S , cantidad que se atribuye a corriente generada por la iluminación del dispositivo y que se explica como una fotocorriente producida por la difusión y arrastre de los portadores minoritarios a través de la juntura semiconductor.

Lo anterior se concreta en el principio de superposición según el cual, al diodo representado en la juntura p-n, se "superpone" una fuente de corriente proveniente de los efectos de la iluminación de la celda.

Es decir:

$$I(V) = I_0 (\exp(eV/kT) - 1) - I_S \quad (1)$$

representa la característica corriente-voltaje de una celda solar ideal, donde el término $I_0 (\exp(eV/kT) - 1)$ tiene en cuenta el diodo en lo "oscuro", y el término superpuesto (sumado, si se desea), $-I_S$ la fotocorriente producto de la iluminación.

En la ecuación (1) e está representado la unidad de carga eléctrica, k la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta, V la diferencia de potencial de polarización en la juntura, I la corriente, y finalmente, I_0 la denominada corriente de saturación en reversa, característica típica del material (o materiales) empleados en la fabricación del diodo.

En la Figura 1a, se presenta un modelo electrotécnico de una celda solar ideal, en donde conectada en paralelo a un diodo ordinario se encuentra una fuente de corriente constante.

En la figura 1b, se muestra una característica corriente-voltaje para una celda solar bajo diferentes condiciones de iluminación; desde una inexistente, hasta iluminación de alta intensidad, circunstancia que se refleja en el incremento de I_S . Esta gráfica permite también la definición de otras cantidades importantes para las celdas solares. En efecto, V_{OC} representa el denominado "voltaje de circuito abierto", que bajo circunstancias de iluminación es el corte de la curva de la característica con el eje horizontal. Además, I_{SC} es la "corriente de corto circuito", valor que en general no coincide con I_S y es el corte de la curva con el eje vertical. Finalmente (V_p, I_p) representa el punto de máxima potencia para la celda solar de acuerdo con las condiciones de iluminación.

Resulta pertinente aclarar que I_S no crece indefinidamente con la iluminación a que es sometida una celda solar, así ésta se considere ideal. En efecto, la densidad de corriente j_S (corriente por unidad de área) alcanzará un valor máximo (saturación) en condiciones ideales de fotogeneración, lo que puede ser interpretado como una recolección óptima de los portadores minoritarios fotogenerados y difundidos a través de la juntura semiconductor. Es decir, que la producción de pares electrón-hueco por cada fotón contribuye efectivamente a la corriente en la celda, y que, además, todos los pares susceptibles de ser generados, efectivamente lo son.

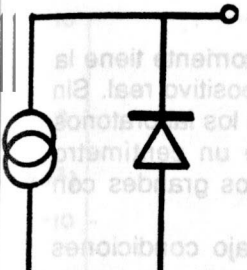


Figura 1a. Modelo electrotécnico celda solar ideal.

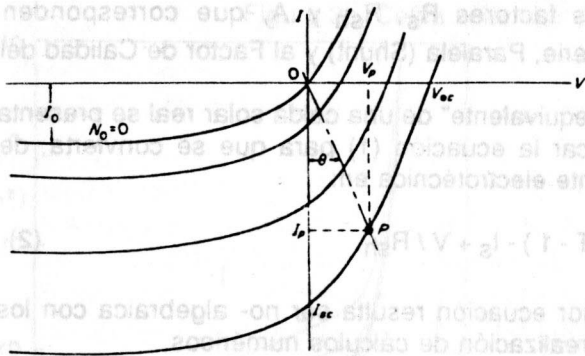


Figura 1b. Característica corriente voltaje Celda solar bajo diferentes condiciones de iluminación.

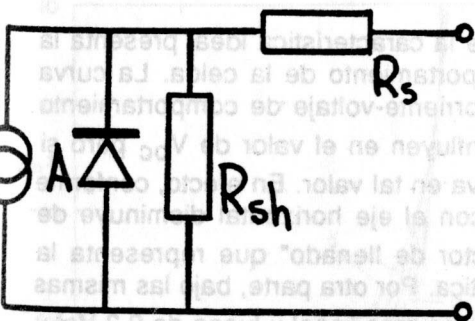


Figura 2. Modelo Electrotécnico celda solar real. R_s Resistencia en serie. R_{sh} resistencia en paralelo. A factor calidad diodo.

La descripción de la característica en términos de la densidad de corriente tiene la ventaja intrínseca que resulta independiente de la geometría del dispositivo real. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, no es lo mismo trabajar en los laboratorios con celdas experimentales de superficies pequeñas (del orden de un centímetro cuadrado), a los resultados que se obtienen en arreglos fotovoltaicos grandes con áreas de los metros cuadrados.

Los valores de j_s calculados y obtenidos experimentalmente, bajo condiciones estándares de iluminación, están entre los 20 y los 50 mA/cm², dependiendo de los materiales empleados y de las diversas tecnologías existentes para la fabricación de las celdas.(1)

Desviaciones del Comportamiento Ideal.

Como se afirmó anteriormente, las desviaciones del comportamiento ideal en una celda solar se pueden atribuir a los factores R_s , R_{sh} y A , que corresponden respectivamente a la Resistencia en Serie, Paralela (Shunt) y al Factor de Calidad del Diodo.

Dentro de tal esquema, el "circuito equivalente" de una celda solar real se presenta en la figura 2 lo cual permite modificar la ecuación (1) para que se convierta, de acuerdo con una concepción meramente electrotécnica en:

$$I(V) = I_0 (\exp e (V - IR_s) / AkT - 1) - I_s + V / R_{sh} \quad (2)$$

Como se puede apreciar, la anterior ecuación resulta ser no- algebraica con los consecuentes inconvenientes para la realización de cálculos numéricos.

Con base en un algoritmo (3) desarrollado expresamente para encontrar las raíces de ecuaciones trascendentales, entraremos a analizar el efecto aislado de cada uno de los factores que aparecen en la ecuación (2).

Tomaremos como ejemplo una celda solar ideal que bajo condiciones de iluminación estándar posee una densidad de corriente j_s de aproximadamente 23 mA/cm² (caso típico de los dispositivos hechos con base en silicio cristalino) y una superficie de 1 cm².

En la figura 3a, apreciamos el efecto que sobre la característica ideal presenta la existencia de resistencias en serie sobre el comportamiento de la celda. La curva marcada como 1 ($R_s = 0$), representa la curva corriente-voltaje de comportamiento óptimo. Incrementos en los valores de R_s no influyen en el valor de V_{OC} pero si caracterizan marcadamente la pendiente de la curva en tal valor. En efecto, conforme R_s crece, la pendiente de la curva en el corte con el eje horizontal disminuye de manera ostensible. Además, el denominado "factor de llenado" que representa la relación $j_p V_p / j_s V_{OC}$ se deteriora de manera dramática. Por otra parte, bajo las mismas circunstancias (R_s creciendo) la característica se hace más lineal y luego de 0.3 Vol y R_s 8 Ohmios, el comportamiento del dispositivo es totalmente resistivo. Los valores de R_s para las curvas marcadas 2,3, etc.,5 son 2, 4, 6 y 8 Ohmios respectivamente.

En la figura 3b se presentan los efectos de R_{sh} sobre las características corriente-voltaje en las celdas solares. Cuando los valores de R_{sh} son definitivamente altos (mayores de 300 Ohmios), la incidencia sobre la característica ideal es

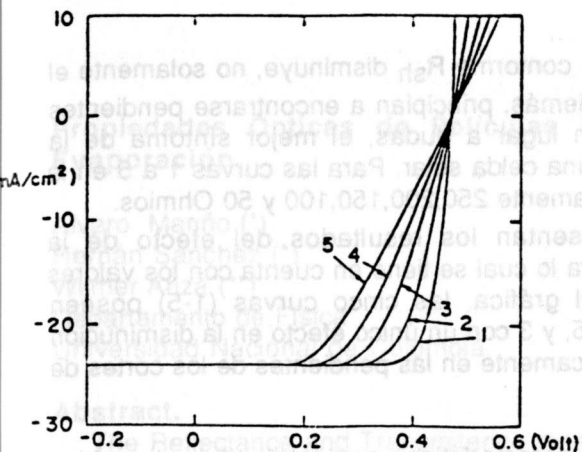


Figura 3a. Celda solar con $R_S = 0, 2, 4, 6$ y 8 Ohmios.

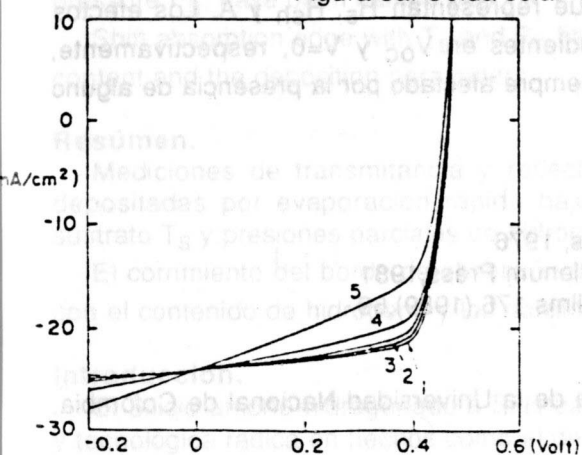


Figura 3b. Celda solar con $R_{Sh} = 250, 200, 150, 100$ y 50 Ohmios.

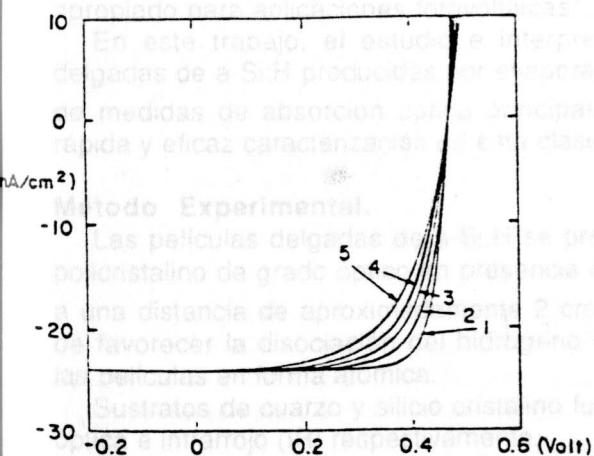


Figura 3c. Celda solar con $A = 1, 1.5, 2, 2.5$ y 3 respectivamente.

prácticamente inobservable. Sin embargo, conforme R_{Sh} disminuye, no solamente el "factor de llenado" disminuye, sino que además, principian a encontrarse pendientes cada vez mayores en $V=0$. Este es, sin lugar a dudas, el mejor síntoma de la existencia de resistencias en paralelo en una celda solar. Para las curvas 1 a 5 en la figura 3b, los valores de R_{Sh} son respectivamente 250,200,150,100 y 50 Ohmios.

Finalmente, en la figura 3c se presentan los resultados del efecto de la recombinación en la juntura semiconductor lo cual se tiene en cuenta con los valores de A mayores que 1. En efecto, en tal gráfica, las cinco curvas (1-5) poseen respectivamente los valores $A=1, 1.5, 2, 2.5,$ y 3 con un único efecto en la disminución del "factor de llenado", no incidiendo prácticamente en las pendientes de los cortes de los ejes.

En resumen, se puede afirmar que las características corriente-voltaje de celdas solares cuyos comportamientos se alejan apreciablemente del ideal, pueden ser explicadas con base en los 3 factores que representan R_S, R_{Sh} y A . Los efectos sobresalientes de R_S y R_{Sh} son las pendientes en V_{OC} y $V=0$, respectivamente, mientras que el "factor de llenado" se ve siempre afectado por la presencia de alguno de los parámetros analizados.

Referencias

1. Solar Cells. C Backus (Editor) IEEE Press, 1976
2. R. Dalven, Appied Solid State Physics, Plenum Press,1981
3. M.García C., H.Sánchez M., Thin Solid Films 176,(1989),69

(*) Profesor del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

