

AJUSTE DE CURVAS $I - V$, EN CELDAS SOLARES CON Y SIN ILUMINACION

T. Núñez, J.C. Durán, E.M. Godfrin

Comisión Nacional de Energía Atómica Departamento Fuentes Renovables
y U.R.E. Av. Libertador 8250, 1429 Buenos Aires.

Se presentan las ventajas y desventajas de varios métodos usados tradicionalmente para determinar los parámetros del circuito equivalente de una celda solar mediante el ajuste de curvas $I - V$ experimentales. Se implementa un método previamente publicado e introduciendo mejoras en el algoritmo original se obtiene un ajuste satisfactorio para curvas experimentales con pocos puntos o mediciones con errores considerables. Se incluye un método de estimación de los errores de los parámetros obtenidos a partir de una única medición.

I. INTRODUCCION

Las celdas solares pueden simularse con precisión con modelos de circuito equivalente¹. La determinación de los parámetros del modelo constituye un aspecto importante para la caracterización de las celdas y puede contribuir al control de calidad del proceso de fabricación de las mismas y a la optimización de su eficacia.

Dado que los parámetros dependen de las condiciones externas - composición espectral, temperatura y nivel de iluminación - la mejor determinación se obtiene a partir de la curva $I - V$ donde todas estas condiciones se mantienen constantes a lo largo de la medición.

En general, el modelo de un diodo describe con precisión el comportamiento de una celda solar. En este caso, la curva corriente-tensión $I - V$ está dada por:

$$I = -I_f + I_0 \left[\exp\left(\frac{V - R_s I}{AV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V - R_s I}{R_{sh}}$$

donde $V_t = \frac{kT}{q}$ (1)

Esta ecuación define cinco parámetros macroscópicos: la corriente fotogeneradora (I_f), la corriente de saturación (I_0), la resistencia serie (R_s), la resistencia paralelo (R_{sh}), y el factor de idealidad del diodo (A).

II METODOS TRADICIONALES DE AJUSTE

En algunos métodos de ajuste, los parámetros se obtienen resolviendo el sistema de 5 ecuaciones asociado a algunos puntos particulares de la curva $I - V$, por ejemplo la corriente de circuito abierto

(V_{oc}), la corriente (I_{max}) y la tensión (V_{max}) en el punto de la máxima potencia, la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la pendiente en sonas estratégicas. Este procedimiento no es recomendable dado que los resultados dependen fuertemente de la determinación precisa de los puntos, de los errores de medición involucrados y de la sensibilidad de los parámetros.

Los métodos que utilizan todos los datos de la curva son mejores pues son menos vulnerables a los errores en puntos particulares y proporcionan un mejor ajuste a lo largo de toda la curva. La forma tradicional de ajuste de curvas consiste en minimizar las diferencias cuadráticas relativas entre los valores experimentales y la curva teórica en función de los cinco parámetros del circuito equivalente. Como quedó establecido en la Ref. 2, este criterio de minimización da demasiado peso a la zona de la curva que contiene más puntos, en detrimento de las menos representadas.

En el mismo trabajo, los autores proponen un criterio alternativo: minimizar el área entre las curvas experimental y teórica para eliminar la dependencia de la densidad de puntos. Aunque este criterio mejora el ajuste sobre todo el rango de la tensión, ambos tienen falencias: son lentos y no utilizan ningún criterio físico.

La información física contenida en las zonas características de la curva es ignorada y, dado que normalmente sólo se cuenta con la curva en un único cuadrante, se desconoce también el comportamiento en los demás. El resultado puede ser entonces un conjunto de parámetros que no represente una solución con sentido físico. Sin embargo, se debe mencionar que éstos métodos permiten estudiar la sensibilidad de los ajustes en función de algunos de los parámetros mediante el cálculo de mínimos locales.

III. METODO PROPUESTO POR D. LAPLAZE E I. YOUM

En el método propuesto por Laplaze y Youm³⁴ tanto para las curvas $I - V$ bajo iluminación cuanto en oscuridad, el cálculo se efectúa por separado para la zona lineal ($V < V_n$) y para la zona exponencial ($V > V_n$). Luego de varias transformaciones algebraicas se pueden realizar regresiones lineales.

Las ventajas de este método residen en que: (a) utiliza todos los puntos; (b) incluye un criterio físico al considerar los valores de V_{oc} y de la dependiente de la curva en V_{oc} (R_0), permitiendo además reducir a tres el número de parámetros que debe determinar; (c) el ajuste se realiza mediante dos regresiones lineales, sin necesidad de tener que resolver la ecuación $I = f(I, V)$.

Sin embargo, el método presenta alguna desventajas. Primero la independencia entre los parámetros β ($\beta = AV_T$) e I_0 mencionada en las Refs. 3 y 4 no es correcta: I_0 se calcula a partir de V_{oc} y β . Segundo, debe recalcar la importancia de un cálculo preciso de R_0 y V_{oc} , ya que ambos son parámetros de entrada y la precisión de los cálculos posteriores dependen fuertemente de ellos. Hemos observado que se producen grandes variaciones en los parámetros (especialmente en I_0 y en R_s) debidas a pequeñas variaciones alrededor del valor óptimo de R_0 (Fig. 1) Esta dependencia es aún mayor cuando se tiene un conjunto de puntos con menor error experimental (Fig. 2).

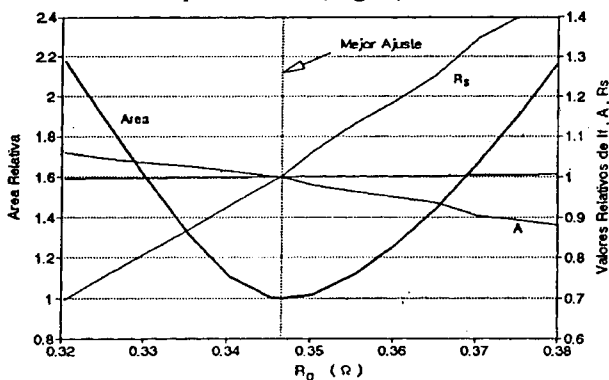


Fig. 1: Valores relativos de I_p , A , R_s y área entre las curvas generada y ajustada, comparados con los del mejor ajuste, como función del valor de R_0 . El ajuste corresponde a una curva $I-V$ teórica con los siguientes parámetros: $I_s=230mA$, $I_0=0,2 \times 10^{-3} mA$, $R_s = 0,13\Omega$, $R_{sh}=11,6\Omega$ y $A=1,54$, y con errores aleatorios en I y en V definidos por (a) $\Delta V=0,1mV + 0,05\%$ y $\Delta I=0,1mA + 0,05\%$ y (b) $\Delta V=0,2mV + 0,1\%$, $\Delta I=0,2mA + 0,1\%$

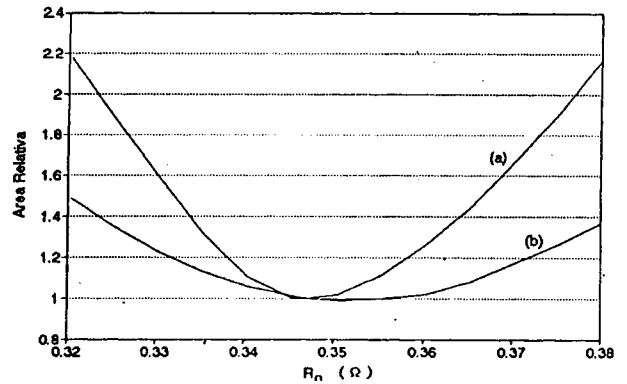


Fig. 2: Variación del área relativa entre las curvas generada y ajustada en función de R_0 para dos curvas con iguales parámetros que en Fig. 1 y dos niveles de error:

(a) $\Delta V=0,1mV + 0,05\%$ y $\Delta I = 0,1mA + 0,05\%$ y (b) $\Delta V + 0,10\%$ y $\Delta I=0,2mA + 0,10\%$

Para el caso de V_n , observamos una situación similar. En algunas curvas $I - V$, la elección de $V_n = V_{oc} / 2$, según lo propuesto en la Ref. 3, no fue adecuada. Además, se debe mencionar que el método es determinístico, lo cual constituye una desventaja adicional: dado que los valores de V_{oc} , R_0 y V_n , son datos, sólo se obtiene un conjunto de parámetros y por lo tanto no puede realizarse un estudio de sensibilidad.

III a. MEJORAS

Con el objeto de mejorar el cálculo de los parámetros y reducir las consecuencias de la desventajas previamente mencionadas, hemos combinado el método de las Refs. 3 y 4 con un criterio de minimización de área. Concretamente, se propone ajustar los parámetros de entrada, R_0 , V_{oc} , y V_n mediante la minimización del área comprendida entre las curvas experimental y teórica (ajustada) en función de los mismos, disminuyendo de esta manera la dependencia de los errores con estos parámetros. Los valores óptimos de R_0 , de V_{oc} y de V_n se obtienen en unas pocas iteraciones gracias a la dependencia del área con los mismos.

III b. ESTIMACION DEL ERROR

Dado que nuestro método sólo produce un conjunto de parámetros y que, normalmente, no se dispone de varias curvas obtenidas en condiciones idénticas, es necesario estimar el error de los parámetros a partir de una sola curva $I - V$. Se asume entonces que la diferencia entre las curvas experimental y teórica define una banda de error

asociada con los errores experimentales de las mediciones y los errores del ajuste.

Entre los errores experimentales, sólo pueden incluirse los aleatorios asociados con la precisión de las mediciones, los errores sistemáticos deben ser cuidadosamente eliminados y los datos experimentales corregidos. Los errores del segundo tipo deben a que, probablemente, existen varios ajustes con características similares -por ejemplo, área similar entre curvas- pero con diferentes parámetros. Debido a la forma de operación determinística, sólo se obtiene uno de estos ajustes.

Definimos una distancia medida d , adimensional, entre las curvas experimental y teórica en función del área entre las mismas y de la longitud de la curva:

$$d \approx \frac{\text{Área Adimensional entre Curvas}}{\text{Longitud Adimensional Curva}} \quad (2)$$

donde Área Adimensional = $\sum_{s=1}^{N-1} \text{Área}_s V_{oc}$ y

$$\text{Área}_s = \begin{cases} \left| \frac{(\Delta I_s + \Delta I_{s+1}) \Delta V}{2 I_{sc} V_{oc}} \right| & \Delta I_s \Delta I_{s+1} > 0 \\ \left| \frac{((\Delta I_s)^2 + (\Delta I_{s+1})^2) \Delta V}{(|\Delta I_s| + |\Delta I_{s+1}|) 2 I_{sc} V_{oc}} \right| & \Delta I_s \Delta I_{s+1} < 0 \end{cases}$$

con

$$\Delta V = (V_{exp})_{s+1} - (V_{exp})_s \text{ y } \Delta I_s = (I_{exp})_s - (I_{teo})_s.$$

La longitud de la curva es:

$$\text{Longitud Adimensional Curva} = \sum_{s=1}^{N-1} L_s \quad (3)$$

$$L_s = \sqrt{\left(\frac{(I_{teo})_s - (I_{teo})_{s+1}}{I_{sc}} \right)^2 + \left(\frac{(V_{teo})_s - (V_{teo})_{s+1}}{V_{oc}} \right)^2} \quad (4)$$

La distancia d define la dispersión con la cual se generarán nuevas curvas con el siguiente procedimiento: se evalúa un corrimiento perpendicular en cada punto, donde la dirección y la cantidad están dadas por una variable aleatoria normal X con el valor nulo y dispersión calculada previamente.

$$(V_{gen})_s = (V_{exp})_s + X V_{oc} \frac{(I_{exp})_s - (I_{exp})_{s+1}}{I_{sc} L_s} \quad (5)$$

$$(I_{gen})_s = (I_{exp})_s + X I_{sc} \frac{(V_{exp})_s - (V_{exp})_{s+1}}{V_{oc} L_s} \quad (6)$$

Luego, se procede al ajuste de esta nueva curva. Repitiendo estos procesos varias veces, puede entonces calcularse el valor promedio y la desviación estándar de cada uno de los parámetros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hemos estudiado varias curvas $I - V$ con iluminación. Se da, a modo de ejemplo, el resultado obtenido para una celda comercial iluminada con radiación solar de 1 kW/m^2 . La Fig. 3 muestra la disminución de los errores en I al variar V_n respecto del valor sugerido en la Ref. 3, lográndose un ajuste más parejo sobre todo el rango de la tensión. Tabl. I: Resultados del ajuste de una curva I-V experimental de una celda comercial.

	I_f (mA)	I_0 (mA)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	A
	232,40	$0,201 \times 10^{-3}$	0,1292	11,56	1,5422
	232,42	$0,211 \times 10^{-3}$	0,1311	11,58	1,54
	$\pm 0,23$	$\pm 0,058 \times 10^{-3}$	$\pm 0,0086$	$\pm 0,08$	$\pm 0,030$
	0,1	27,7	6,6	0,7	1,9

Asimismo, se observa un muy buen ajuste aún con pocos valores para definir R_0 . En la Tabla I se resumen los resultados obtenidos incluyendo los errores estimados para los parámetros, utilizando el método propuesto previamente. Es de destacar que en otros casos analizados, con los valores de R_{sh} grandes, los errores de la curva $I - V$ producen errores importantes en el cálculo de R_{sh} , llegando incluso a carecer de sentido físico el valor obtenido del ajuste ($E_{sh} < 0$).

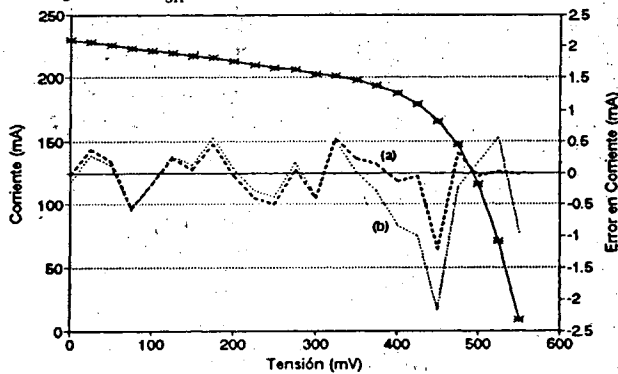


Fig. 3: Gráfico I-V de una celda comercial incluyendo valores experimentales (*), ajuste teórico (-) y diferencias entre ambos para el mejor ajuste (a) y con el V_n propuesto en Ref. 3.

Asimismo, se observa un muy buen ajuste aún con pocos valores para definir R_0 . En la Tabla I se resumen los resultados obtenidos incluyendo los errores estimados para los parámetros, utilizando el método propuesto previamente. Es de destacar que en otros casos analizados, con los valores de R_{sh} grandes, los errores de la curva $I - V$ producen

errores importantes en el cálculo de R_{sh} , llegando incluso a carecer de sentido físico el valor obtenido del ajuste ($E_{sh} < 0$).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a C. Bruno y G. Azzaroni quienes, con su trabajo y colaboración, han hecho posible la obtención de las curvas experimentales.

REFERENCIAS

1. H.J. Hovel, Semiconductors and Semimetals, Vol. 11, Solar Cells, Academic Press, New York (1975).
2. Jacob C.H. Thang, Daniel S.H. Chang, Solar Cells 18,1 (1986).
3. D. Laplaze, I. Youm, Solar Cells, 14, 167 (1985).
4. D. Laplaze, I. Youm, Solar Cells, 14, 179 (1985).