

ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE IDEALIDAD DEL DIODO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DEGRADADOS

Roberto F. Farfán^a y María T. Montero Larocca^b

^a Facultad de Ingeniería, INENCO, UNSa- CONICET Av. Bolivia 5150, 4400, Salta, Argentina,
fede_farfan@hotmail.com

^b Facultad de Ciencias Exactas INENCO, UNSa Av. Bolivia 5150, 4400, Salta

Palabras claves: Fotovoltaico, Ajuste de curva.

Resumen: La energía solar fotovoltaica constituye una importante alternativa en la producción de electricidad, no solo en zonas aisladas sino en centros poblados conectados a redes de distribución. Debido a la prolongada exposición de los módulos a los factores atmosféricos y a la radiación, se observa una disminución en su producción de potencia. Esto se debe a un conjunto de diferentes factores, principalmente desde el punto de vista óptico y eléctrico. El estudio de la degradación del camino óptico muestra como resultado, una importante pérdida de transmitancia de los materiales de la cubierta transparente, efecto que se añade a un incremento en la resistencia serie, una disminución en la resistencia paralelo y una variación del factor de idealidad del diodo. Los datos obtenidos de distintas mediciones de módulos se utilizaron como entrada para un algoritmo, que permite el cálculo de los parámetros del módulo en estudio. El algoritmo se basa en un ajuste que responde a un modelo de celda fotovoltaica. La información obtenida del algoritmo, permite realizar una estimación del factor de idealidad del diodo.

1 INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo muestra la aplicación de un algoritmo que permite ajustar la curva I-V de un panel fotovoltaico obtenida de un modelo matemático de celda fotovoltaica, a una curva real de panel medida. El panel fotovoltaico constituye la principal fuente de energía de una instalación autónoma fotovoltaica y es el resultado de asociar un conjunto de celdas fotovoltaicas en serie y paralelo. El uso diario de este sistema de paneles y su exposición a la intemperie provoca el deterioro de las celdas fotovoltaicas, conduciendo a que la potencia entregada por el panel disminuya. Los efectos de la pérdida de potencia pueden observarse al analizar las curva I-V de los paneles a través del tiempo, ya que la pérdida de potencia viene acompañada de la modificación de esta curva. El ajuste de la curva I-V se realiza por medio de un método iterativo similar al implementado en el ajuste de la base de conocimiento en los sistemas basados en lógica difusa (Nomura, 1992). El ajuste se basa en generar la curva I-V por medio de un modelo matemático de panel en función de los datos medidos y parámetros desconocidos (factor de idealidad de diodo y resistencia serie). El ajuste modifica los parámetros desconocidos hasta que la sumatoria de las distancias entre los puntos de la curva I-V obtenidos de las medidas con los puntos obtenidos del modelo matemático de panel sea mínima. Para distintos valores de factores de idealidad de diodo se realizó un ajuste variando la resistencia serie, obteniéndose una curva I-V con su correspondiente sumatoria de las distancias entre los puntos. El mejor valor estimado de resistencia serie y factor de idealidad corresponde al ajuste de menor error o al ajuste donde se obtuvo el menor valor de las sumatoria de las distancias entre puntos medidos y generados.

2 MODELO DE CELDA Y PANEL

El elemento más importante de un panel son las celdas fotovoltaicas. Estas son las encargadas de la conversión de la energía radiante en energía eléctrica por medio de un fenómeno conocido como efecto fotovoltaico. En la figura 1 se observa el modelo circuital para una celda fotovoltaica.

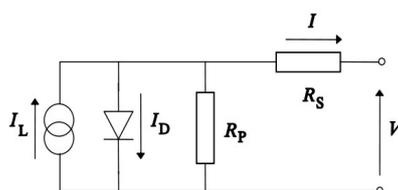


Figura 1. Modelo circuital de una celda fotovoltaica.

En la figura 1 se indica la diferencia de potencial de los bornes de la celda con la variable V y la corriente que entrega la celda con la variable I . El resto de las magnitudes marcadas en la figura responde a parámetros internos del modelo que caracterizan la eficiencia de la celda. Las variables involucradas en el modelo circuital se relacionan por medio de la expresión 1 (Lorenzo, 1994).

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{(V + I R_s)}{R_p} \quad (1)$$

Donde I_L es la corriente fotogenerada producida por la energía radiante, I_0 es la corriente de saturación inversa producida por la recombinación de portadores, V_t es el voltaje térmico dado por la expresión 2, R_s es una resistencia denominada serie que engloba la región emisora

y base, metalización de la celda y la terminación de la caja de juntura y R_p es la resistencia paralelo, que representa cualquier camino de alta conductividad a través de las juntas p-n o en el borde.

$$V_t = \frac{nKT}{e} \quad (2)$$

En la expresión del voltaje térmico, T representa la temperatura de celda en grados kelvin, K es la constante de Boltzmann, e es la carga del electrón y n es el factor de idealidad del diodo. La curva I-V que describe la expresión 1 se observa en la figura 2, donde se marcan algunos puntos característicos de la curva como: la corriente de corto circuito (I_{CC}), la tensión de circuito abierto (V_{CA}) y el punto de máxima potencia (MP).

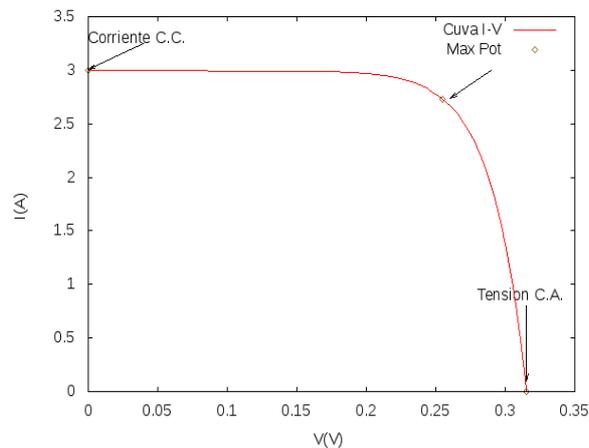


Figura 2. Curva I-V de una celda fotovoltaica.

Por medio del modelo de celda descrito se puede obtener un modelo de panel fotovoltaico, ya que un panel es un generador constituido por un conjunto de celdas en serie y en paralelo. Generalmente el conjunto de celdas que forma un panel no son idénticas, de manera que la obtención de la curva I-V del conjunto puede llegar a ser muy compleja. Generalmente para la mayoría de los problemas prácticos no es necesaria tanta exactitud, por lo que en el modelo se toman las siguientes idealizaciones:

- Los efectos de la resistencia paralelo son despreciables.
- La corriente I_L es la máxima corriente que el panel puede entregar.
- $e^{\left(\frac{V+IR_s}{V_t}\right)} > 1$ en cualquier condición de trabajo.
- Todas las celdas son iguales y trabajan iluminadas de la misma forma y a la misma temperatura.
- La resistencia de los conductores que conectan las resistencias son despreciables.

Aceptadas las idealizaciones, se puede calcular la corriente I_G y la diferencia de potencial V_G del panel por medio de la siguiente expresión.

$$V_G = N_s V \quad (3)$$

$$I_G = N_p I \quad (4)$$

Donde N_p el número de ramas conectadas en paralelo, compuesta cada una de ellas por N_s número de celdas asociadas en serie. Reemplazando la expresión 3 y 4 en 1 se obtiene la expresión 5.

$$I_G = (I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_G + I_G R_s}{N_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_G}{N_s} + \frac{I_G R_s}{N_p}) N_p \quad (5)$$

Considerando las idealizaciones a, b y c, de la expresión 5 se obtiene la siguiente.

$$I_G = I_{SCG} \left(1 - \left(e^{\frac{V_G V_{OCG} + I_G R_{SG}}{N_s V_t}} \right) \right) \quad (6)$$

Donde I_{SCG} es la corriente de cortocircuito del panel, V_{OCG} es la tensión de circuito abierto del panel y R_{SG} es la resistencia serie del panel. De esta ultima expresión se obtiene la ecuación que se utiliza en el algoritmo iterativo, despejando V_G .

$$V_G = V_{OCG} - I_G R_{SG} + N_s V_t \ln \left(1 - \frac{I_G}{I_{SCG}} \right) \quad (7)$$

3 CURVA I-V DE PANEL

La expresión 7 se utiliza para modelar la curva del panel medida. Se puede observar que la misma se encuentra en función de parámetros que se medirán en cada curva como: I_{SCG} y V_{OCG} y parámetros que variaran y se buscaran en el algoritmo, que inicialmente desconocemos como R_{SG} y el factor de idealidad del diodo. Estas variables son importantes en la eficiencia de un panel fotovoltaico apreciándose en la curva I-V la influencia de cada una de ellas, en la figura 3 se grafican las curvas de un panel con $I_{SCG}=3A$, $V_{OCG}=18V$, $V_t=0.025V$ influenciado por distintas resistencias series.

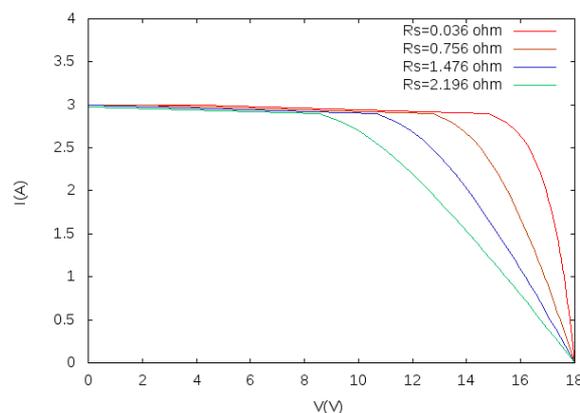


Figura 3. Curvas I-V de un panel fotovoltaica con distintas R_{SG} .

Idealmente la resistencia serie de un panel fotovoltaico es muy pequeña, sin embargo la degradación del mismo produce un aumento de esta. La curva I-V sufre modificaciones que afectan la potencia que puede entregar, ya que el producto de la tensión por la corriente en la

región donde generalmente trabaja el panel sera menor. En la figura 3 se observa claramente como el punto de máxima potencia tiende a ser menor.

La resistencia serie es una magnitud que puede ser medida utilizando distintos métodos (Imamura, Helm y Palz , 1992), sin embargo trabajar con el factor de idealidad del diodo no es algo tan sencillo. Por ello en este trabajo se desea utilizar un método para estimar el mismo. De la misma manera que la resistencia serie, el factor de idealidad del diodo produce modificaciones en la curva I-V de un panel como se observa en la figura 4, donde se grafica las curvas de un panel fotovoltaico con $I_{SGC}=3A$, $V_{OCG}=18V$, $R_{SG}=0,072\Omega$ influenciado por distintos factores de idealidad de diodo.

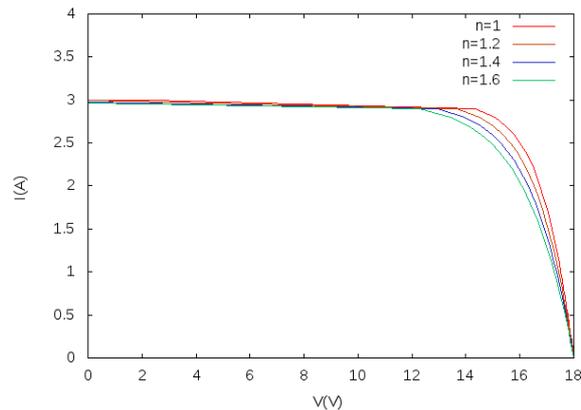


Figura 4. Curvas I-V con distintos factores de idealidad de diodo.

En esta parte del trabajo es conveniente aclarar que parte de la bibliografía donde se plantea el modelo de celda fotovoltaica, el factor de idealidad de diodo es un valor que se encuentra entre uno y dos (Lorenzo, 2006) sin embargo hay artículos donde se utilizan valores mayores a estos (Priyanka, Lal y Singh , 2007)

4 ALGORITMO DE AJUSTE

El algoritmo permite calcular el valor de la R_{SG} y el factor de idealidad de diodo de una curva de panel fotovoltaico medida, realizando ajustes de la curva I-V del modelo matemático de panel a la curva I-V medida. El algoritmo calcula la curva I-V para distintos factores de idealidad de diodo, para valores entre 1 y 3. Para cada factor de idealidad de diodo se genera una curva I-V matemática, ajustando la misma al cambiar R_{SG} . El cambio de R_{SG} produce un cambio en la función E dada por la expresión 8, que es la sumatoria de las distancias entre los puntos obtenidos de las medidas con los puntos obtenidos del modelo matemático (Nomura, 1992). La iteración de R_{SG} se realiza hasta que la función E sea mínima.

$$E = \sum_{i=1}^N \left(V_{Gi} - V_{Gi}^r \right)^2 \quad (8)$$

En la expresión 8 N indica la cantidad de puntos con los que se van a trabajar en el algoritmo, V_{Gi}^r es el valor de tensión medido para una I_G medida y V_{Gi} es el valor de tensión generado al remplazar un I_G medido en la expresión 7. En la figura 5 se observa como ejemplo la curva de un panel medido con distintos puntos, puntos generados por el algoritmo y las distancias entre puntos.

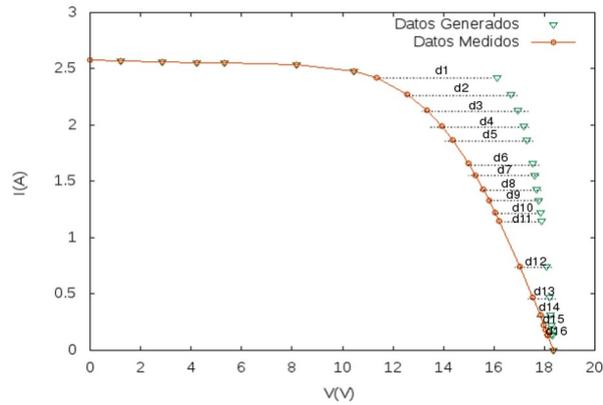


Figura 5. Curvas I-V medida y puntos generados por el algoritmo.

Este procedimiento se realiza para distintos valores de factores de idealidad de diodo, de manera que se obtienen distintas curvas, cada una con un valor particular de R_{SG} , E y factor de idealidad de diodo. El mejor valor calculado de R_{SG} y de factor de idealidad de diodo se obtienen del proceso de iteración donde la función E final fue menor. En la figura 6 muestra el diagrama de flujo del algoritmo.

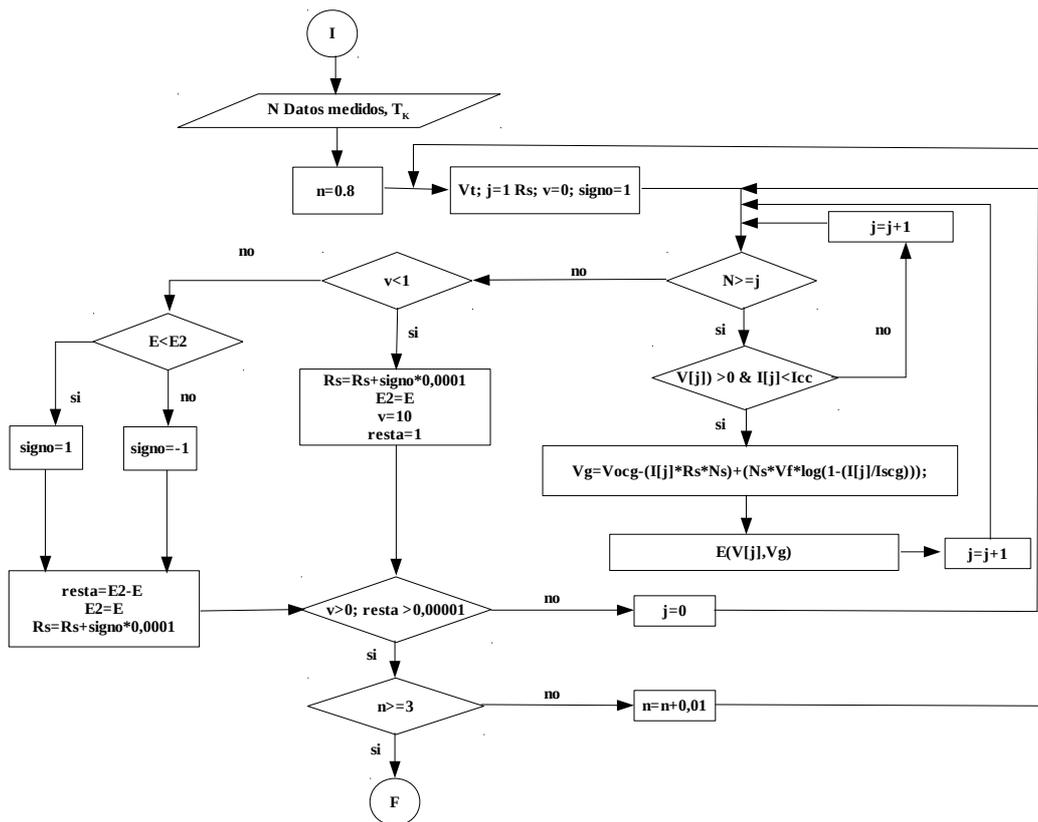


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo.

Para este trabajo los ajuste se realizaron utilizando un algoritmo programado en lenguaje C y que corre en un sistema operativo Linux. En el programa realizado conviven distintos procesos, entre ellos el de hacer funcionar el algoritmo generando información del modelo de panel y el ajuste. Esta información se guarda en archivos y la misma se utiliza para graficar,

redireccionando la información por medio de tuberías a un programa denominado GNUPLOT.

5 MEDIDAS Y RESULTADOS DEL ALGORITMO ITERATIVO

La efectividad del método se comprobó al aplicar el algoritmo a curvas medidas de paneles fotovoltaicos de 45W, cuya resistencia serie se conocía. Para el calculo de resistencia serie se utilizo la norma IEC 891 e IRAM 210013-2. En la figura 7 se observa la variación de la función E para cada factor de idealidad de diodo a medida que varia R_{SG} para la curva medida que se observa en la figura 5.

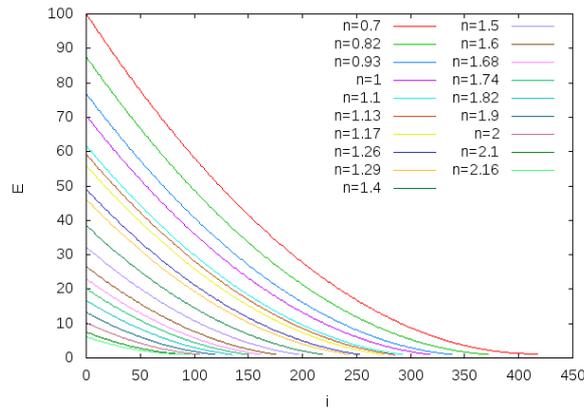


Figura 7. Variación de E en función del número de iteraciones.

La estimación es buena si el algoritmo calcula un valor de R_{SG} cercano al valor conocido del panel y un factor de idealidad dentro de los rangos permitidos. En la siguiente figura se observan los puntos de las curvas que generó el algoritmo para cada valor de factor de idealidad de diodo.

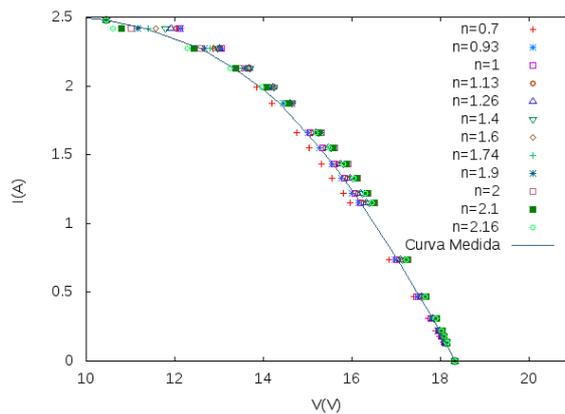


Figura 8. Puntos de las curvas I-V generada por el algoritmo.

En la figura 9 se muestra los valores finales de la función E para cada factor de idealidad que se planteo. Este gráfico permite determinar donde se encuentra el error mínimo y se observa que los valores finales de E determinan una región donde se encuentran las posibles soluciones. El menor valor de E que encontró el algoritmo es de 0.958316 V^2 , para una resistencia de $1.143998 \text{ } \Omega$ y un factor de idealidad de $n=1,13$. La resistencia serie de este

panel se determino como indica la norma, por medio de tres curvas I-V medidas para distintas radiaciones: 1000W/m^2 , 665W/m^2 y 512W/m^2 . Bajo estas condiciones se calculo las resistencia serie: $1,275\ \Omega$, $1,76\ \Omega$ y $1,19\ \Omega$, obteniéndose un promedio de $1,41\ \Omega$.

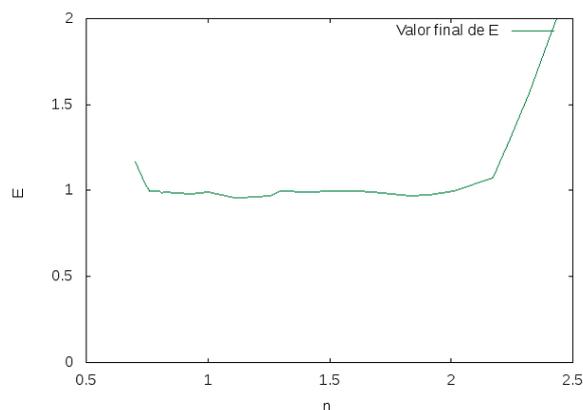


Figura 9. Valores finales de la función E para cada valor de n.

Se puede observar que el algoritmo encontró un valor aproximado al que se determino por medio de la norma y un factor de idealidad de diodo aceptable en la bibliografía.

6 CONCLUSIONES

Debido a la prolongada exposición a los agentes atmosféricos y a las radiaciones los paneles fotovoltaicos disminuyen su eficiencia. Esta perdida de producción de potencia se debe principalmente a los cambios de las propiedades ópticas de los materiales de la cubierta transparente y a la degradación de los componentes del modelo de circuito equivalente, como el aumento de la resistencia serie, el factor de idealidad del diodo y la disminución de la resistencia paralelo. Es por esta razón, que es importante contar con un método numérico que a partir de una curva medida y conocido algunos parámetros permita estimar las variables mencionadas. En especial cuando estos parámetros son difíciles de ser medidos en forma directa.

En cuanto al método utilizado para la estimación, se observa que el algoritmo encuentra buenos resultados si se trabaja con puntos medidos que no se encuentren cercanos a la corriente de corto circuito. Esto es por que la variación de la curva en inmediaciones de la corriente de corto circuito se debe a la resistencia paralelo, que no se tubo en cuenta en el modelo que utiliza el algoritmo debido a las idealizaciones realizadas. Por otro lado, en la mayoría de la bibliografía argumentan que el efecto de la resistencia paralelo es despreciable frente a los demás factores. Pero en el desarrollo de este algoritmo se observa que tener en cuenta este efecto produciría un mejor ajuste de la curva, obteniendo de esta manera mejores resultados.

REFERENCIAS

- Imamura M.S., Helm P. y Palz W. Photovoltaic System Technology , *Commission of the European Communities*, 86-92, 1992.
- Lorenzo E. *Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos*, volumen II. Progensa, diciembre, 2006.

Lorenzo E. *Electricidad Solar – Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos*, ProgenSA, primera edición, 1994.

Nomura Hiroyoshi, Hayashi Isao and Wakama Noboru, A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Descent Method . *Proceedings IEEE International Conference on Fuzzy System*, 203-210, 1992.

S.N. Singh, Priyanka and Mohan Lal, A new method of determination of serie and shunt resistances of silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91:137-142, 2007.