

FACILIDAD TEÓRICO-EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

G.Azzaroni, C.Bruno, L.Dawidowski, J.C.Durán
A.Frigerio, E.Godfrin, T.Nuñez¹
*Comisión Nacional de Energía Atómica,
Depto. Fuentes Renovables y Uso Racional de la Energía,
División Energía Solar
Avda Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires*

Resumen

La determinación de los parámetros del circuito equivalente de las celdas solares permite, en principio, su evaluación y posterior selección para optimizar el conexionado en un panel fotovoltaico. Esta determinación se realiza a partir de las curvas características I-V. En este trabajo describimos las facilidades de medición y el modelo de ajuste implementados en esta División a tal fin. Los elementos centrales de la facilidad experimental son un simulador solar y una carga electrónica variable. El primero es de tipo estacionario con lámpara halógena de tungsteno con bulbo de cuarzo y filtro dicróico. La carga implementada permite registrar la curva I-V en todo el cuarto cuadrante, para un amplio rango de corrientes y tensiones, lo que hace posible la medición de celdas y paneles. El programa usado para ajustar la curvas medidas es una versión mejorada de uno que realiza el modelado por sectores: a través de minimizar la diferencia de áreas entre la curva experimental y la ajustada se logra una convergencia más rápida. Presentamos resultados del ajuste de curvas I-V de celdas solares medidas bajo radiación solar directa y con el simulador solar.

1 INTRODUCCION

Las celdas solares son dispositivos semiconductores utilizados en la conversión directa de la luz solar en electricidad. La medición de la curva I-V de celdas solares, es de gran importancia para la evaluación tanto del proceso de fabricación, como para su utilización en un circuito interconectado. De ella se pueden extraer datos tales como, la eficiencia de conversión, el punto de máxima

¹Trabajo realizado como tesis de licenciatura de Ciencias Físicas. FCEN. UBA

potencia, y con la ayuda de métodos gráficos y/o numéricos, los parámetros del circuito equivalente tales como resistencia serie, paralelo, características del diodo equivalente, etc.

La medición de la curva I-V, con incidencia de luz bajo irradiancia y temperatura especificadas y constantes, consiste básicamente en conectar en los bornes de salida de la celda un resistor de carga variable, que al variar entre sus valores extremos (idealmente cortocircuito y circuito abierto), recorre todos los pares de valores I-V que conforman la curva. A pesar de su aparente simpleza, esta medición presenta una serie de características particulares. Para una celda típica de silicio monocristalino de 100 cm² de superficie, entre el 80 y el 90% de la curva se barre con valores de carga por debajo del Ohm. Su corriente de cortocircuito es del orden de 2,4 A y su tensión de circuito abierto de 0,6 V; las curvas I-V son alineales.

Para llevar a cabo esta medición en forma repetible con la obtención de datos estabilizados y con una facilidad operativa adecuada es necesario por un lado, que la carga variable no sea un resistor variable, que hace en muchos casos la medición casi impracticable, sino un dispositivo electrónico denominado carga electrónica.

Complementariamente otro aspecto de estas determinaciones es la conveniencia de contar con una fuente de luz equivalente a la solar, pero obtenible a voluntad para independizarse de las variaciones meteorológicas y estacionales, a los efectos de sistematizar la calificación de las celdas fotovoltaicas. Por eso hemos desarrollado un primer prototipo de simulador solar cuyas características describiremos en este trabajo.

Por último, si bien gráficamente es posible evaluar las características de respuesta de estos dispositivos, una herramienta valiosa tanto en el diseño de las celdas como en la elaboración de criterios para optimizar los interconexiones que conducen a los paneles fotovoltaicos, es un programa de simulación y ajuste. Aquí nos ocuparemos de mostrar el implementado para el ajuste de curvas características de celdas solares con iluminación.

2 CARGA ELECTRONICA VARIABLE

2.1 Descripción general

Para la realización de la carga electrónica se tuvieron en cuenta consideraciones de diseño de las cuales se mencionan algunas seguidamente.

La medición de la curva I-V se hace por el método de 4 terminales (Método de Kelvin). La carga debe ser capaz de sostener una corriente finita a 0V (una corriente relativamente alta);

FACILIDAD TEÓRICO-EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

G.Azzaroni, C.Bruno, L.Dawidowski, J.C.Durán
A.Frigerio, E.Godfrin, T.Nuñez¹
*Comisión Nacional de Energía Atómica,
Depto. Fuentes Renovables y Uso Racional de la Energía,
División Energía Solar
Avda Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires*

Resumen

La determinación de los parámetros del circuito equivalente de las celdas solares permite, en principio, su evaluación y posterior selección para optimizar el conexionado en un panel fotovoltaico. Esta determinación se realiza a partir de las curvas características I-V. En este trabajo describimos las facilidades de medición y el modelo de ajuste implementados en esta División a tal fin. Los elementos centrales de la facilidad experimental son un simulador solar y una carga electrónica variable. El primero es de tipo estacionario con lámpara halógena de tungsteno con bulbo de cuarzo y filtro dicróico. La carga implementada permite registrar la curva I-V en todo el cuarto cuadrante, para un amplio rango de corrientes y tensiones, lo que hace posible la medición de celdas y paneles. El programa usado para ajustar la curvas medidas es una versión mejorada de uno que realiza el modelado por sectores: a través de minimizar la diferencia de áreas entre la curva experimental y la ajustada se logra una convergencia más rápida. Presentamos resultados del ajuste de curvas I-V de celdas solares medidas bajo radiación solar directa y con el simulador solar.

1 INTRODUCCION

Las celdas solares son dispositivos semiconductores utilizados en la conversión directa de la luz solar en electricidad. La medición de la curva I-V de celdas solares, es de gran importancia para la evaluación tanto del proceso de fabricación, como para su utilización en un circuito interconectado. De ella se pueden extraer datos tales como, la eficiencia de conversión, el punto de máxima

¹Trabajo realizado como tesis de licenciatura de Ciencias Físicas. FCEN. UBA

potencia, y con la ayuda de métodos gráficos y/o numéricos, los parámetros del circuito equivalente tales como resistencia serie, paralelo, características del diodo equivalente, etc.

La medición de la curva I-V, con incidencia de luz bajo irradiancia y temperatura especificadas y constantes, consiste básicamente en conectar en los bornes de salida de la celda un resistor de carga variable, que al variar entre sus valores extremos (idealmente cortocircuito y circuito abierto), recorre todos los pares de valores I-V que conforman la curva. A pesar de su aparente simpleza, esta medición presenta una serie de características particulares. Para una celda típica de silicio monocristalino de 100 cm² de superficie, entre el 80 y el 90% de la curva se barre con valores de carga por debajo del Ohm. Su corriente de cortocircuito es del orden de 2,4 A y su tensión de circuito abierto de 0,6 V; las curvas I-V son alineales.

Para llevar a cabo esta medición en forma repetible con la obtención de datos estabilizados y con una facilidad operativa adecuada es necesario por un lado, que la carga variable no sea un resistor variable, que hace en muchos casos la medición casi impracticable, sino un dispositivo electrónico denominado carga electrónica.

Complementariamente otro aspecto de estas determinaciones es la conveniencia de contar con una fuente de luz equivalente a la solar, pero obtenible a voluntad para independizarse de las variaciones meteorológicas y estacionales, a los efectos de sistematizar la calificación de las celdas fotovoltaicas. Por eso hemos desarrollado un primer prototipo de simulador solar cuyas características describiremos en este trabajo.

Por último, si bien gráficamente es posible evaluar las características de respuesta de estos dispositivos, una herramienta valiosa tanto en el diseño de las celdas como en la elaboración de criterios para optimizar los interconexiones que conducen a los paneles fotovoltaicos, es un programa de simulación y ajuste. Aquí nos ocuparemos de mostrar el implementado para el ajuste de curvas características de celdas solares con iluminación.

2 CARGA ELECTRONICA VARIABLE

2.1 Descripción general

Para la realización de la carga electrónica se tuvieron en cuenta consideraciones de diseño de las cuales se mencionan algunas seguidamente.

La medición de la curva I-V se hace por el método de 4 terminales (Método de Kelvin). La carga debe ser capaz de sostener una corriente finita a 0V (una corriente relativamente alta);

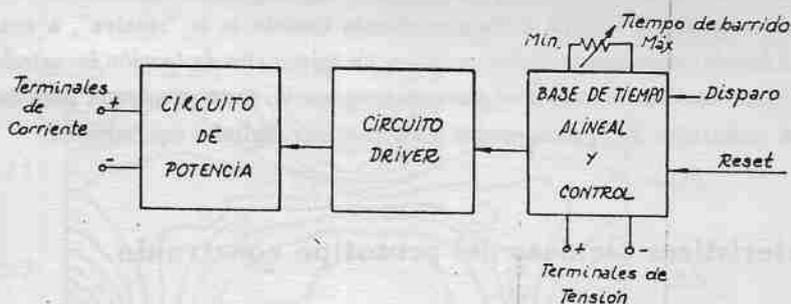


Figura 1: Diagrama en bloques de la carga electrónica variable

debe presentar una resistencia equivalente en el otro extremo de la característica, superior a los $100\text{ k}\Omega$ (para asegurar un error de método bajo, en la medición de circuito abierto); debe permitir operación local o remota, para la realización de mediciones en laboratorio o con exposición al sol, compensando las pérdidas en cables y contactos. Como la curva es alineal, el barrido deberá serlo también para que la densidad de información sea homogénea sobre todo el trazado. Este barrido será monótono y automáticamente variable, con tiempos de barrido que tengan en cuenta la velocidad de respuesta de la celda y de los instrumentos indicadores, y sean lo suficientemente cortos para considerar las condiciones atmosféricas constantes, en el caso de las mediciones bajo luz solar, y no producir elevación de temperatura en el dispositivo, en ninguno de los dos casos (iluminación natural y artificial). Podrá hacer barridos totales o parciales en el cuarto cuadrante y extensión al tercer cuadrante. Deberá tener flexibilidad en cuanto a soportar la medición de una celda o un conjunto de ellas, y adaptación automática a distintas irradiancias.

En base a estas consideraciones se diseñó y construyó un prototipo de carga electrónica, versión mínima y modificada basada en el trabajo del proyecto de la referencia [1], actualmente en funcionamiento.

2.2 Descripción del circuito

Este dispositivo se realizó de acuerdo con el diagrama en bloques que se muestra en la figura 1. El circuito de potencia consta básicamente de transistores MOS de potencia, conectados en paralelo, que operan la mayor parte del tiempo en la región de saturación y una batería de compensación de pérdidas en cables. El circuito "driver" acomoda los niveles de señal entre las etapas.

La base de tiempo es alineal para lograr una densidad de información similar sobre toda la curva; como la curva I-V de una celda solar, al igual que la característica de salida de los transistores de potencia, es alineal, todo se basa en la composición de señales no lineales. Cuando se dispara la

carga, esta barre desde su posición de reposo (circuito abierto) hasta corriente de cortocircuito, a la velocidad seleccionada y retorna a circuito abierto cuando se la "resetea", a una velocidad mucho mayor. Además posee una realimentación en los terminales de tensión levantados de masa para la detención del barrido en cualquier punto seleccionable. Está preparada para funcionar en conjunto con un registrador X-Y, osciloscopio o alternativas digitales equivalentes.

2.3 Características técnicas del prototipo construido

- Corriente máxima: 8A a 0V
- Tensión máxima: 45V a 0A
- Manejo máximo de potencia: 105W
- Resistencia equivalente a circuito abierto: 200 K Ω
- Base de tiempo: alineal, variable de 0,5s a 25s (barrido total)
- Comandos: disparo, reset (modo automático), barrido manual
- Operación: local o remota
- Miscelaneas: adaptación automática a distintas irradiancias
- Fuente de alimentación: batería de 9V

3 SIMULADOR SOLAR

Los simuladores solares usados para proveer la irradiancia sobre los dispositivos fotovoltaicos durante pruebas controladas de laboratorio, deben cumplir severas condiciones especificadas en las normas ASTM E927. Esto es así porque la respuesta de una celda solar es una función fuertemente dependiente de la longitud de onda de la irradiancia incidente. Los simuladores, tanto los pulsados como los estacionarios, pueden ser clasificados como A, B o C, según la tolerancia aceptada respecto a los siguientes puntos: a) no uniformidad de la irradiancia total en el área de la muestra a medir, b) inestabilidad temporal de irradiancia y c) apartamiento de la distribución espectral respecto de la correspondiente a un espectro estándar AM1.5. Un simulador debe reunir todos los requerimientos de una clase particular para pertenecer a esa clase.

El simulador solar implementado en nuestro laboratorio es de tipo estacionario y usa una lámpara halógena de tungsteno con bulbo de cuarzo filtro dicróico, alimentada con una fuente estabilizada de continua. La potencia de esta lámpara es de 250 Watts a 24 Volts (ELC en el código ANSI). Los distintos elementos (lámpara, difusor y soporte de la celda) están alineados sobre un banco

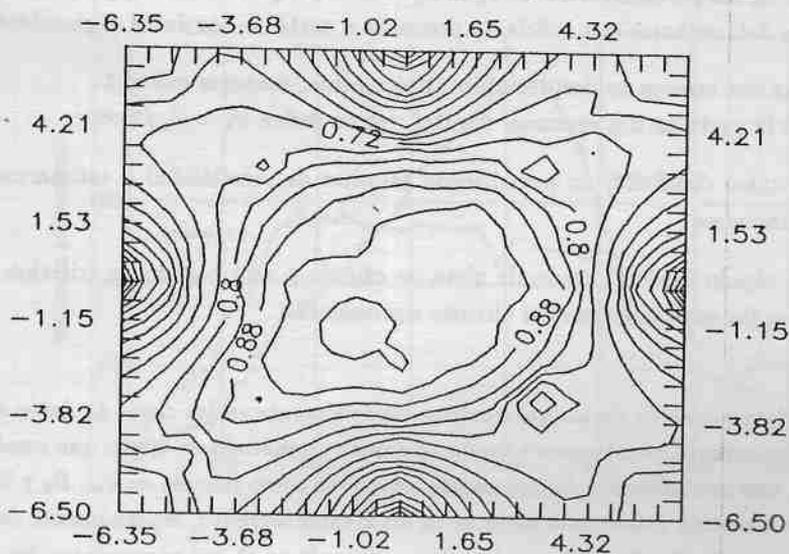


Figura 2: Curvas de nivel de la irradiancia obtenidas con el simulador de lámpara dicróica. Los valores de distancias están dados en cm, y los de irradiancia en las curvas de nivel, están normalizados respecto del máximo central

óptico y las distancias (de lámpara al plano de medición, 50 cm y al difusor, 30 cm) son las que aseguran sobre la celda a medir una irradiancia estándar (100 mW/cm^2), pero se pueden variar a voluntad. La irradiancia estándar sobre el plano de la célula a medir puede ser obtenida midiendo la respuesta de una celda solar calibrada instalada en la parte posterior del soporte de la celda a medir; este soporte puede ser rotado 180° . Se ha interpuesto un difusor entre la lámpara y la celda para aumentar la uniformidad en el plano de esta última. Se logra una uniformidad mejor que el 10% en una superficie de $8 \times 8 \text{ cm}^2$, medida con un fotodiodo de silicio que desplazamos sobre una grilla ubicada en el plano de la celda a medir (figura 2).

Aunque una lámpara dada es estable en la mayor parte de su vida útil, la salida de luz, la temperatura de color (cerca de 3200°K en nuestro caso) y la distribución espectral pueden variar significativamente de lámpara a lámpara, y entre fabricantes, aunque la lámpara esté especificada por un código ANSI [2]. Por esto se determinaron sus características reales, en lo que respecta a respuesta espectral, homogeneidad espacial e irradiancia. La medición de la respuesta espectral fue realizada con un espectroradiómetro EG&G y es la que se observa en el figura 3, contrastada con el espectro solar AM1.5, normalizados ambos para dar una irradiancia total de 100 mW/cm^2 . La comparación se hace por intervalos de longitud de onda de 100 nm en el rango de 400 a 900 nm más uno de 200 nm hasta los 1100 nm con distintos márgenes de aceptación según la clase. En este caso, si bien en dos de los intervalos clasifica en A, las diferencias en los cuatro restantes llevan a clasificarlo como C.

en dicha tensión ($R_0 = dV/dI)_{V_{oc}}$) a partir de las mediciones experimentales. Los valores que se obtienen de los parámetros del circuito equivalente dependen de V_{oc} y R_0 , los que no siempre pueden determinarse con suficiente precisión a partir de los datos disponibles.

- Para mediciones con errores no despreciables (típicamente, mayores que el 1% para subdividir la curva en dos sectores. En Ref. [4], se define $V_n = V_{oc}/2$.
- Determina un único resultado, no permitiendo estudios de sensibilidad o estimaciones de error en los parámetros.
- Es sumamente rápido desde el punto de vista de cálculo y está basado en criterios físicos relacionados con las características del circuito equivalente.

A fin de mejorar la determinación de los parámetros, especialmente en los casos de datos experimentales con error importante, planteamos e implementamos un método de ajuste que combina el propuesto en [4] con una minimización del área entre las curvas como función de V_{oc} , R_0 y V_n . Los resultados obtenidos muestran claramente mejoras en los ajustes logrados, especialmente debido a una mejor determinación de R_0 . En la figura 4 se da un ejemplo en el que se comparan las curvas I-V experimental y teórica, para una celda comercial iluminada con radiación solar.

La estimación del error de parámetros del circuito equivalente obtenidos a partir de una única curva experimental, se realiza suponiendo que las diferencias entre esta última y la curva teórica definen una banda de error asociada con errores experimentales y con errores del proceso de ajuste. La generación aleatoria de un determinado número de curvas I-V dentro de dicha banda de error y su posterior ajuste, permite evaluar el error de los parámetros.

5 Mediciones de curvas I-V. Conclusiones

Se han levantado varias curvas I-V al sol y con el simulador. Para ello contó con la carga electrónica variable mencionada y un registrador x-y HP. Las curvas que se muestran en la figura 5 corresponden a las de una celda solar de 15 cm^2 bajo diferentes condiciones de irradiancia y a una temperatura de $(29 \pm 2)^\circ\text{C}$. Los parámetros que caracterizan el comportamiento de una celda fotovoltaica son: la corriente de cortocircuito I_{sc} , el voltaje a circuito abierto V_{oc} , el factor de llenado FF y la eficiencia η . Para comparar los valores obtenidos al sol y con el simulador, consideremos los obtenidos de las curvas de la figura:

Para la curva (a), medida al sol con una irradiancia de 94 mW/cm^2 :

$$I_{sc} = (370.3 \pm 4.8) \text{ mA}$$

$$V_{oc} = (563.6 \pm 5.0) \text{ mV}$$

$$FF = (0.627 \pm 0.015)$$

$$\eta = (8.97 \pm 0.26)\%$$

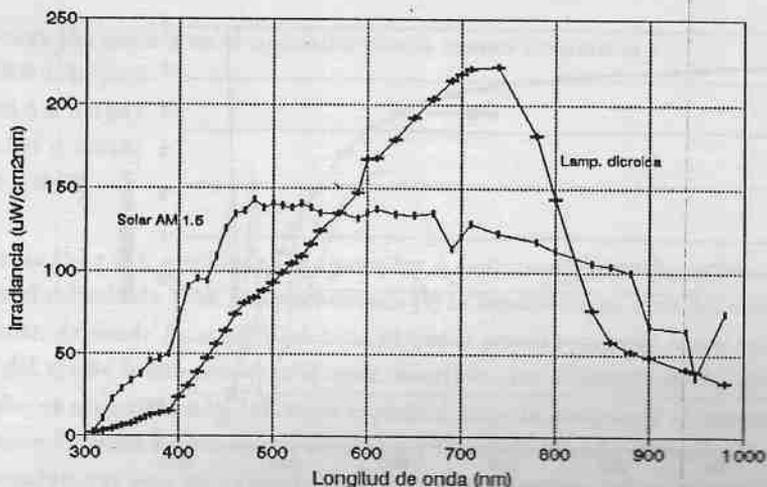


Figura 3: Gráfico comparativo de la respuesta espectral de la lámpara dicróica y el espectro solar AM1.5

4 METODO DE AJUSTE DE CURVAS I-V

Los métodos tradicionales de ajuste de curvas I-V consisten en minimizar las diferencias cuadráticas entre la medición experimental y la curva teórica en función de los parámetros del circuito equivalente (típicamente 5 parámetros para un modelo de un diodo). Estos métodos dan demasiado peso a los sectores de la curva con mayor número de datos experimentales [3]. En Ref. [3] se propone un criterio alternativo que evita este inconveniente basado en la minimización del área entre ambas curvas.

Métodos numéricos como los mencionados tienen el defecto importante de ser lentos y de no utilizar criterios físicos para la determinación de los parámetros. Como alternativa, Laplace y Youm [4] presentaron un método que realiza el cálculo dividiendo la curva característica I-V en dos zonas asociadas, respectivamente, a bajos voltajes (lineal) y a altos voltajes (exponencial). Mediante transformaciones algebraicas, ambos problemas se reducen a regresiones lineales que deben ser resueltas en forma iterativa [4].

Las características de este último método son básicamente las siguientes.

- Requiere la determinación de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) y la pendiente de la curva

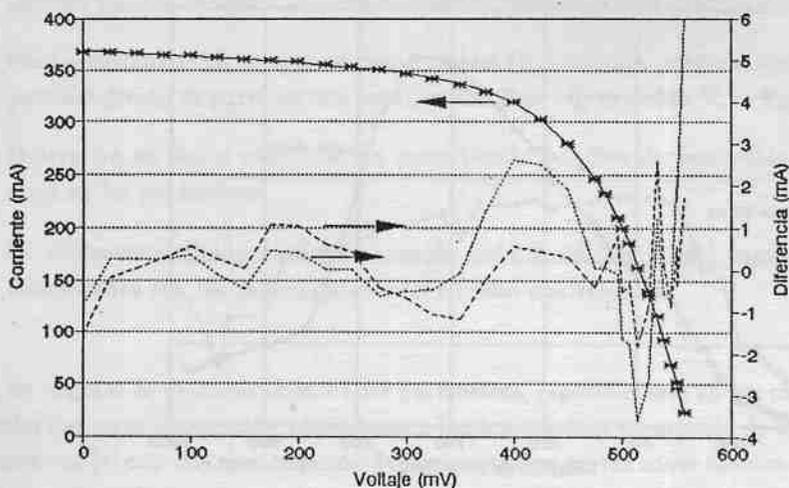


Figura 4: Valores experimentales (*) y curva I-V ajustada mediante el método propuesto, para una celda comercial. (a) Diferencia entre los valores experimentales y los ajustados con el mejor ajuste, y (b) Idem, con $V_n = V_{oc}/2$.

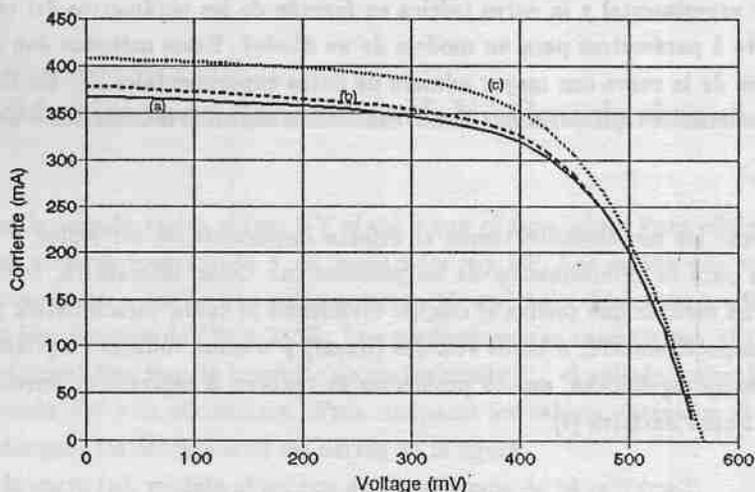


Figura 5: Curvas I-V de una celda comercial iluminada con: (a) radiación solar (94 mW/cm^2), (b) simulador solar (94 mW/cm^2), y (c) simulador solar (108 mW/cm^2).

Para la curva (b), medida en el simulador con la misma irradiancia :

$$I_{sc} = (379.5 \pm 4.9) mA$$

$$V_{oc} = (563.6 \pm 5.0) mV$$

$$FF = (0.627 \pm 0.015)$$

$$\eta = (9.00 \pm 0.26)$$

De las curvas (b) y (c), medidas en el simulador a distintas irradiancias es posible obtener gráficamente por el método de Wolf y Rauschenbach [5] la resistencia en serie del circuito equivalente de la celda solar, de donde $R_s = (0.067 \pm 0.011) \Omega$ que se puede comparar con el valor $(0.059 \pm 0.009) \Omega$ obtenido del ajuste hecho con el programa descripto. La diferencia de I_{sc} obtenida al sol y con el simulador es atribuible a la diferencia espectral entre la lámpara y el espectro AM1.5. Sin embargo el acuerdo sobre los valores de eficiencia y factor de llenado obtenidos de ambas curvas, nos permite concluir que este instrumento es apto para caracterizar celdas solares en forma confiable.

Referencias

- [1] C.D. Alesi, C.J. Bruno, M.C. Caffaratti, H.R. Caldez, "Carga electrónica para medición de celdas fotovoltaicas", trabajo presentado como proyecto final de la carrera de Ingeniería Electrónica UTNFRBA 1991
- [2] R.J. Matson, K.A. Emery, R.E. Bird, "Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation and Solar Cell Short-Circuit Current Calibration: A Review", Solar Cells 11 (1984).
- [3] J.C.H. Phang, D.S.H. Chan, "A review of curve fitting error criteria of solar cells I-V characteristics", Solar Cells 18, 1 (1986).
- [4] D. Laplaze, I. Youm, "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque. I. Détermination des Paramètres à partir de la Caractéristique Courant-Tension sous Eclairment", Solar Cells 14, 167 (1985).
- [5] M. Wolf, H. Rauschenbach, "Series resistance effects on solar cells measurements", Energy Converter. 3, 455 (1963).