

CARACTERIZACION DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA: COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES Y SIMULADOS APLICANDO UN MODELO TEORICO SIMPLE

Alberto LLAMAZARES, Arturo J. BUSSO y Noelia. BAJALES LUNA

Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – UNNE

Campus Av. Libertad – Av. Libertad 5600 – 3400 Corrientes

e-mail: adllama@yahoo.com.ar

RESUMEN

Se expone un trabajo de laboratorio tendiente a la implementación de una práctica sobre generación fotovoltaica en el Dpto. de Física de la Fac. de Cs. Exactas de la UNNE.

Se describe la metodología de trabajo seguida, resultados obtenidos para la caracterización experimental de una celda fotovoltaica, su modelización y posterior validación de los modelos. Los modelos empleados contemplan tanto el fenómeno a nivel microscópico (comportamiento físico de la unión p-n) como a nivel macroscópico (circuito equivalente).

Para la modelización se hace uso del programa MATHEMATICA.

ABSTRACT

The implementation of a laboratory experiment on PV generation at the Physics Department of the Facultad de Ciencias Exactas – UNNE is presented.

The methodology followed and results obtained for the characterization of a crystalline silicon solar cell as well as its comparison with simulated values using simple microscopic and macroscopic models is also detailed.

For the simulation runs the program MATHEMATICA was used.

PALABRAS CLAVE

Celdas solares, unión p-n, diodo, fotodiodo, circuito equivalente, generador solar.

ANTECEDENTES

El creciente interés a nivel mundial por la utilización de fuentes renovables para satisfacer demandas energéticas de distinto orden se debe principalmente a una cada vez mayor concientización acerca de lo limitado de las reservas de combustibles fósiles así como también al deterioro ambiental que estos producen.

La Argentina no está fuera de esta tendencia pero aun falta mucho trabajo por hacer para que estas tecnologías sean adoptadas.

En este contexto, dentro del Dpto. de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNNE, se está constituyendo un grupo dedicado al campo de las energías renovables que, entre otras actividades, pretende implementar laboratorios de tipo rutinario que permitan una mayor difusión y conocimiento de estos temas dentro del ámbito académico de la facultad.

Como punto de inicio en esta tarea, se encaró la implementación de un laboratorio para el estudio de las características de las celdas fotovoltaicas.

El presente escrito expone por tanto, los resultados de la experiencia realizada. De la misma se sacaron conclusiones, no solo relacionadas con la temática en cuestión, sino también referente a correcciones a introducir en la metodología aplicada.

DESARROLLO DEL TRABAJO Y METODOLOGÍA APLICADA:

La comparación de los datos obtenidos experimentalmente se realizó empleando dos modelos simples de celda fotovoltaica: uno microscópico basado en el comportamiento físico ideal de la unión p-n bajo iluminación (Llamazares et al., 2000) y el otro macroscópico basado en el circuito eléctrico equivalente.

En el primer caso, se asume la validez del principio de superposición. Este indica que la corriente que fluye a través del dispositivo bajo condiciones de iluminación es igual a la suma de la corriente de corto circuito, I_{sc} , más la corriente que sería producida cuando se polariza en la oscuridad a la celda con un potencial V igual al generado bajo iluminación.

La figura 1 muestra el circuito eléctrico equivalente empleado. Este consiste en una fuente de corriente y un diodo conectados en paralelo. Una fotocorriente I_{ph} , proporcional a la intensidad de la radiación solar incidente sobre el dispositivo es generada por la fuente de corriente. La unión p-n de la celda solar es representada por un diodo (polarizado en directa). La resistencia R_s , representa la caída interna de potencial hasta los terminales de contacto. Bajo estas condiciones, la ecuación de $I(V)$ del circuito puede entonces ser derivada directamente aplicando las leyes de Kirchoff para circuitos eléctricos.

Con el objeto entonces de comparar las características eléctricas experimentales de una célula fotovoltaica con los resultados predichos por un modelo simple de célula, se realizaron las siguientes determinaciones:

Determinación de la curva experimental corriente vs. tensión de una célula fotovoltaica de silicio cristalino:

La figura 2 muestra el dispositivo utilizado compuesto por los siguientes elementos:

- Fuente de luz. Como fuente de luz natural fue empleada la luz solar en un día de cielo despejado en horario alrededor del medio día. Como fuente de luz artificial se utilizó una lámpara incandescente halógena alimentada con una batería de 12 V DC a fin de lograr estabilidad en el espectro de emisión.
- Celda fotovoltaica de Silicio cristalino SFH 120 fabricada por la firma Siemens.
- Solarímetro fotovoltaico.
- Graficador x-y. Las curvas I-V a diferentes intensidad de iluminación se graficaron directamente mediante un graficador de dos canales con amplificación de tensiones adecuadas.
- Dispositivo divisor resistivo y sensor de corriente. El divisor resistivo estaba compuesto por un potenciómetro, R_p , de variación continua lineal y el sensor de corriente por una resistencia, R , calibrada de bajo valor óhmico para evitar introducir errores sistemáticos considerables.
- Sensor de temperatura. Consistía en una termocupla fijada a la cara posterior de la célula con el objeto de monitorear la temperatura de la misma durante los ensayos.

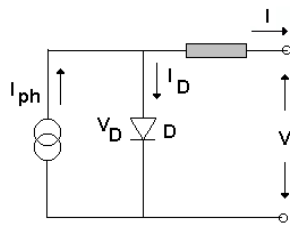


Fig.1.- Circuito eléctrico equivalente de la celda fotovoltaica

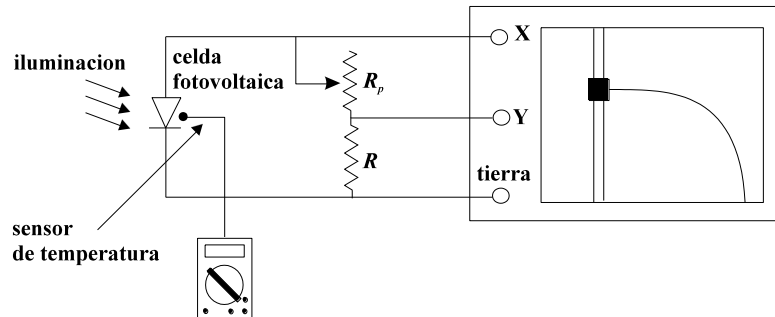


Fig.2.-Esquema del equipo utilizado en las mediciones de las curvas I-V.

Determinación de los parámetros necesarios para los cálculos:

Para calcular los dos puntos notables, corriente de corto circuito I_{sc} y tensión de circuito abierto V_{oc} , de la curva característica I-V se utilizó un modelo simple implementado con el asistente Mathematica, desarrollado en un trabajo anterior (Llamazares et al., 2000).

Éstos valores se utilizaron como datos para calcular los puntos de la curva I-V mediante el circuito eléctrico equivalente de la célula. Como ya ha sido mencionado, el modelo de circuito equivalente empleado considera solamente un diodo y resistencia serie, aparte de la fuente de corriente fotogenerada.

A continuación se describen los parámetros críticos necesarios en el modelo de simulación:

Distribución espectral de la fuente de luz:

- Luz Solar: para modelizar el espectro de radiación solar se utilizó la ley de radiación del cuerpo negro de Planck para la temperatura del anillo solar, o espectro AM0 ideal, afectado de un factor de escala adecuado para representar la irradiancia total de los casos de estudio.
- Fuente artificial: para modelizar esta fuente de luz se utilizó la ley de Planck para la temperatura de color de la lámpara halógena.

Resistencia serie y factor de calidad A, de la célula:

Se determinó la resistencia serie, R_s , de la célula para cada estado de iluminación mediante el método de Wolf (Treble, 1991).

El factor de calidad A de la célula fue determinado mediante una aproximación empírica en función del factor de relleno FF , según el método de ajuste de curvas I-V de MARQUARDT (Krezinger, 1994) para células de silicio mono y policristalino.

Para obtener el factor de relleno FF de una curva experimental se halló el punto de máxima potencia, para lo cual se hizo uso de las utilidades del asistente ORIGIN para calcular la función derivada primera de la curva de potencia.

Corriente de saturación I_s :

Este parámetro era necesario para el cálculo de la tensión de circuito abierto V_{oc} , y se lo determinó a partir de las curvas I-V experimentales haciendo uso de la siguiente expresión:

$$I = I_{sc} - I_s \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_T} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

donde: $V_T = A \cdot k \cdot T / q$

siendo: $k =$ cte. de Boltzmann

$T =$ temperatura absoluta de la célula

$q =$ carga elemental

Se comprobó que la corriente I_s , así calculada tendía hacia un valor mínimo a medida que V se acercaba a V_{oc} . Se adoptó entonces como valor para I_s este valor mínimo asintótico.

Profundidad de difusión x_j y ancho de la región de agotamiento w :

En el modelo microscópico empleado la variable x representa la profundidad del material semiconductor con su origen en la superficie de la cara iluminada. Para el cálculo de la densidad espectral de corriente $J_n(x, \lambda, V)$, se debe realizar una integración múltiple en la cuál el límite superior para la variable x es la suma de la profundidad de difusión x_j más el ancho de la región de agotamiento w . Las otras variables independientes son la longitud de onda λ y el potencial generado V bajo condiciones de iluminación.

El valor utilizado para x_j se tomó de la literatura disponible (Mompín Poblet J., *et al*, 1985). El ancho w se calculó en base a la teoría del comportamiento fotovoltaico ideal de uniones semiconductoras (Castañer Muñoz, 1992).

Integración de $J_n(x, \lambda, V)$:

El cálculo de la integral se realizó considerando $V = 0$. Los extremos de integración de la variable λ fueron tomados del intervalo de longitudes de onda entre las cuales se distribuye el 95% de la energía que llega a la superficie terrestre, eliminando las bandas de absorción atmosférica. (Duffie y Beckman, 1980)

Determinación de la tensión de circuito abierto V_{oc} :

La tensión de circuito abierto se calculó con la siguiente expresión:

$$V_{oc} = V_T \cdot \ln \left[1 + \frac{J_{sc}}{J_0} \right] \quad (2)$$

donde: J_{sc} = densidad de corriente de corto circuito.
 J_0 = densidad de corriente de saturación inversa.

En este modelo simple J_0 es solamente función de x y de V . Dado que los extremos de integración de x eran conocidos, se utilizó como variable de ajuste la tensión V para obtener el valor de I_s más cercano al experimental.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO CON LOS VALORES EXPERIMENTALES:

Respuesta espectral absoluta de la célula fotovoltaica:

Se calculó la curva de respuesta espectral absoluta de la célula con la siguiente expresión:

$$SR_{\lambda} = \frac{J_n(\lambda, V)}{E_{\lambda}} \quad (3)$$

donde: E_{λ} = curva de irradiancia incidente.

La curva resultante presenta correspondencia cualitativa con curvas experimentales encontradas en la literatura (Treble, 1991), como se observa en la figura 3.

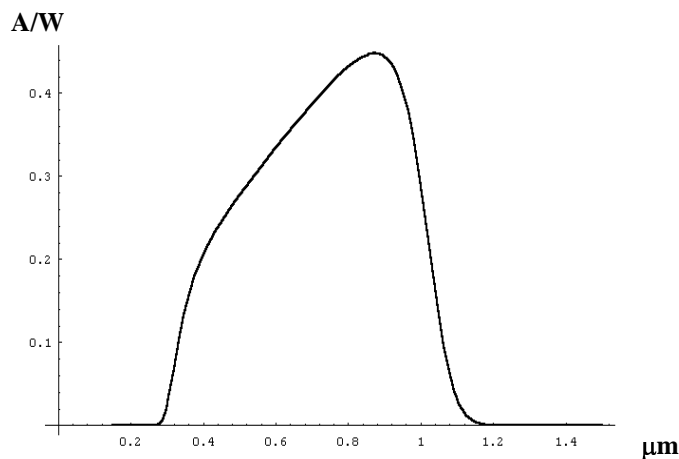


Fig.3- Gráfico de Respuesta Espectral Absoluta obtenida mediante el modelo teórico.

Curvas características I-V:

La figura 4 muestra curvas I-V típicas obtenidas durante las experiencias para distintos niveles de iluminación. Para el caso de alta irradiancia incidente los valores predichos por el modelo para I_{sc} y V_{oc} , se acercan a los experimentales con error menor al 1 %. En el caso de baja irradiancia el modelo produce valores inferiores a los experimentales. Tal desviación

suponemos se debe a que la inyección de portadores minoritarios contribuye a la corriente real, situación esta no contemplada en el modelo teórico utilizado.

En la figura 5 se presentan las curvas I-V experimental y predicha por el modelo de circuito equivalente simple considerado. Se observa una desviación para los puntos centrales debida a que el modelo no incluye la resistencia shunt que toma en cuenta corrientes de fuga que se producen en el sistema real.

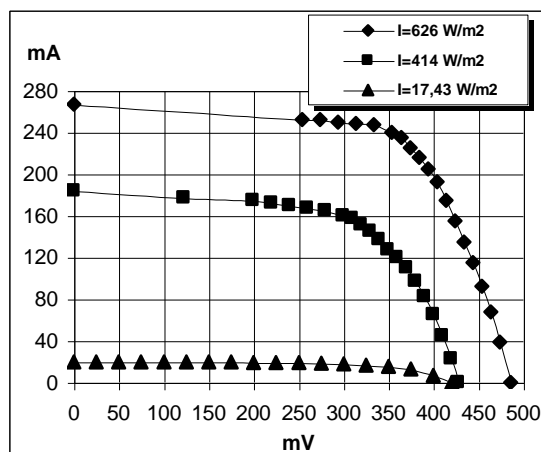


Fig.4.- Curvas I-V de iluminación experimental para distintas irradiancias.

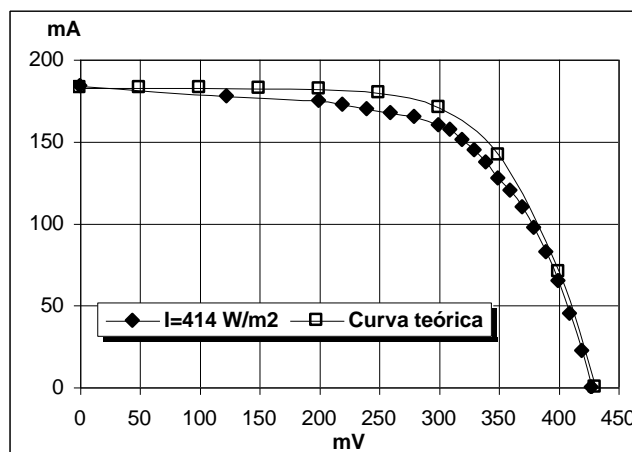


Fig.5.- Comparación de curvas I-V experimental y predicha a partir del modelo de circuito equivalente simple.

CONCLUSIONES:

Se determinaron experimentalmente curvas I-V para una celda fotovoltaica a diferentes niveles de intensidad de iluminación. Estos datos fueron comparados con dos modelos que simulan el comportamiento de una celda solar.

Se comprobó que los valores de I_{sc} y V_{oc} predichos por el modelo teórico basado en el comportamiento físico ideal de la unión p-n bajo iluminación, concuerdan dentro del 1% con los experimentales para irradiancias altas dando valores inferiores a los experimentales para bajas irradiancias.

Se argumenta que esta discrepancia a bajas irradiancias se debe a las limitaciones impuestas por el propio modelo.

Se demuestra una concordancia entre las curvas características I-V experimental y simulada aplicando el circuito eléctrico equivalente compatible con lo encontrado en la literatura.

Se logro además representar la curva de respuesta espectral absoluta para la celda en cuestión, la cual se ajusta cualitativamente con los datos de literatura.

Se debe destacar la prestación del programa Mathematica para cálculos de tipo analíticos o numéricos como en los casos de las corrientes del circuito equivalente de célula, y de la tensión del punto de máxima potencia de la curva I-V, etc.

BIBLIOGRAFÍA:

Llamazares A. D.; García Raffi L. M., Sánchez Pérez E. A., Sánchez Pérez J. V.(2000).Modelización de una unión p-n de silicio para su uso en un panel fotovoltaico utilizando el programa Mathematica. *II Jornadas Docentes del Departamento de Física Aplicada*. Universitat Politècnica de València.

Krezinger A., (1994). Modelos Matemáticos para la simulación de Sistemas Fotovoltaicos por Ordenador *I Congreso Latinoamericano Sobre Energías Alternativas*, 27-38. UTN.Córdoba.

Castañer Muñoz L., (1994). Energía Solar Fotovoltaica. Ediciones UPC. España.

Mompín Poblet J., varios, (1985). Energía Solar Fotovoltaica, Serie Mundo Electrónico. Marcombo.Barcelona-México.

Eisberg R.; Resnick R., (1986). Física cuántica : Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. Limusa. México.

Benet Gilabert Ginés, (1988). Contribución a la modelización de los elementos de sistemas solares fotovoltaicos con acumulación en la zona de Valencia. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. España.

Duffie, J. A.y Beckman, W,(1980). A.-Solar Engineering of Thermal Processes.John Wiley & Sons, New York.

Treble F., (1991).Generating Electricity from the Sun.Pergamon Press, Oxford.

Hlawiczka P., (1977). Introducción a la Electrónica Cuántica. Ed.Reverté, Barcelona.