

## **MODELO SENCILLO PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS I-V DE CELDAS Y PANELES SOLARES EN EL AMBIENTE ESPACIAL A PARTIR DE MEDICIONES EN LABORATORIO #**

**E.M. Godfrin<sup>1</sup>, D. Fernández Slezak<sup>2</sup>, J.C. Durán<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Grupo Energía Solar – Gerencia de Investigación y Aplicaciones – Centro Atómico Constituyentes – CNEA  
Av. General Paz 1499 – B1650KNA San Martín – Provincia de Buenos Aires – Argentina  
Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, [www.tandar.cnea.gov.ar](http://www.tandar.cnea.gov.ar), [duan@tandar.cnea.gov.ar](mailto:duan@tandar.cnea.gov.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Computación – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UBA  
Pabellón I – Ciudad Universitaria – 1428 Buenos Aires – Argentina  
Tel/Fax (011) 4576-3359, [www.dc.uba.ar](http://www.dc.uba.ar), [dslezak@dc.uba.ar](mailto:dslezak@dc.uba.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta un algoritmo para la obtención de curvas I-V de celdas y módulos irradiados y a temperaturas reales de operación en órbita, a partir de los valores de los parámetros característicos de celdas sin irradiar, obtenidos en laboratorio a 28°C. Las celdas utilizadas son de triple juntura, para uso espacial, con una eficiencia promedio de 27,5%. La implementación de este algoritmo en el código para la simulación del funcionamiento del subsistema de potencia de satélites (desarrollado en el grupo) permitirá obtener la evolución temporal de los parámetros a lo largo de la misión, desde su comienzo hasta el final, pasando por estados intermedios.

**Palabras claves:** simulación – celdas solares – módulos – irradiación – aplicaciones espaciales

### **INTRODUCCIÓN**

El Grupo Energía Solar de la CNEA, junto a un grupo de trabajo interdepartamental del Centro Atómico Constituyentes, se encuentra trabajando en el desarrollo de los paneles solares para las misiones satelitales SAC-D, SAOCOM-1A y SAOCOM-1B, previstas en el Plan Espacial Nacional, en el marco de una cooperación con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Las actividades en ejecución incluyen, además del desarrollo de las tecnologías de fabricación y ensayo de los paneles, la elaboración de modelos teóricos que permitan diseñar y simular el funcionamiento del subsistema de generación de energía eléctrica (subsistema de potencia) del satélite a lo largo de la vida útil de la misión.

El modelo para la simulación del funcionamiento del subsistema de potencia de un satélite presentado en reuniones anteriores (Berbeglia et al., 2003) requiere disponer de las curvas I-V de los módulos fotovoltaicos (conjunto de cadenas de celdas solares conectadas en paralelo) que conforman el panel solar en condiciones reales de operación, o sea a la temperatura esperada de funcionamiento en órbita y con la degradación de las características eléctricas correspondiente al daño por radiación desde el comienzo de la misión hasta el momento simulado. En dicho modelo, las curvas I-V de los módulos para un momento dado de la misión se generaban sumando las curvas I-V (en serie y en paralelo) de las celdas solares que los conforman, previamente corregidas mediante los factores por cambio de temperatura y por daño por radiación. Para obtener una evolución temporal más detallada que considere las diferentes temperaturas de operación y el daño por radiación creciente a lo largo de la misión (desde “Beginning Of Life”-BOL hasta “End Of Life-EOL, pasando por estados intermedios), es altamente conveniente disponer de una técnica analítica o numérica sencilla que permita generar las curvas I-V de los módulos en función del tiempo y la temperatura, sin necesidad de recurrir a las curvas I-V de las celdas individuales para cada simulación.

En este trabajo se presenta un método numérico sencillo para la generación de curvas I-V de celdas y módulos solares irradiados y sometidos a las temperaturas de operación esperadas en el ambiente espacial, a partir de las mediciones de celdas sin irradiar e irradiadas con la fluencia correspondiente a EOL, realizadas en laboratorio a temperatura controlada (28°C) con simulador solar AM0 (“close match solar Simulator”).

---

# Trabajo financiado fundamentalmente por la CNEA y la CONAE. Cuenta también con aportes de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2003 N° 10-14327).

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Las celdas para uso espacial utilizadas para la elaboración de los paneles son de triple juntura GaInP-GaInAs-Ge ("Advanced Triple Junction", ATJ) provistas por Emcore. La hoja técnica que las describe (Advanced Triple Junction, 2004) contiene los coeficientes de variación por temperatura y los factores de corrección debido al daño por radiación de los parámetros eléctricos que las caracterizan: tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ ), corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ), y tensión ( $V_{max}$ ) y corriente ( $I_{max}$ ) en el punto de máxima potencia, para diferentes irradiaciones, expresadas en fluencias equivalentes de electrones de 1 MeV. Teniendo en cuenta que la simulación del panel solar y del subsistema de potencia requiere disponer de la curva I-V completa, fue necesario establecer un algoritmo que permitiera obtener la misma a partir de los parámetros mencionados previamente, ya sea provistos por el fabricante o medidos en el laboratorio.

Los parámetros eléctricos característicos de las celdas irradiadas operando a una temperatura diferente a la de medición están relacionados con los parámetros medidos sobre las celdas sin irradiar y en condiciones normalizadas mediante la siguiente ecuación:

$$X = X_0 * Factor(X) + \frac{\Delta X}{\Delta T} * (T_i - T_0) \quad (1)$$

donde  $X_0$  representa el parámetro característico considerado ( $V_{ca}$ ,  $I_{cc}$ ,  $V_{max}$ , o  $I_{max}$ ) de la celda sin irradiar y medido en condiciones normalizadas;

$X$ , el parámetro característico considerado irradiado y/o a distinta temperatura de las condiciones normalizadas;

Factor ( $X$ ), el factor de corrección debido al daño por radiación correspondiente a la fluencia de irradiación;

$\frac{\Delta X}{\Delta T}$ , el coeficiente de variación por temperatura del parámetro  $X$ , el cual es función de la irradiación;

$T_i$ , la temperatura de operación esperada

$T_0$ , la temperatura de medición normalizada o indicada por el fabricante (habitualmente, 28°C).

Para la obtención de los demás puntos de la curva I-V en condiciones reales de operación, se propone el siguiente algoritmo:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_2 = I_1 * \left[ \frac{V_1}{V_{max1}} * \frac{I_{max2}}{I_{max1}} + \left( 1 - \frac{V_1}{V_{max1}} \right) * \frac{I_{cc2}}{I_{cc1}} \right] \\ V_2 = V_1 * \left[ \frac{I_1}{I_{max1}} * \frac{V_{max2}}{V_{max1}} + \left( 1 - \frac{I_1}{I_{max1}} \right) * \frac{V_{ca2}}{V_{ca1}} \right] \end{array} \right. \quad (2)$$

donde el subíndice 1 indica el valor del parámetro correspondiente a la celda o módulo sin irradiar y a temperatura normalizada, y el 2, el correspondiente a la celda o módulo irradiado y a temperatura de operación.

## RESULTADOS

### Curva I-V de una celda ATJ

Se aplicó el algoritmo a celdas ATJ irradiadas en el acelerador TANDAR de la CNEA con protones de 10 MeV y una fluencia de  $1,0 \times 10^{12} \pm 0,3 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>. En esta oportunidad se utilizaron los factores de degradación obtenidos a partir de las mediciones de las celdas sin irradiar e irradiadas, en lugar de los provistos por el fabricante. En la Figura 1 se muestra, a modo de ejemplo, los puntos I-V medidos de la celda 35654423A sin irradiar junto con la medición de la misma celda irradiada y la curva obtenida mediante el algoritmo definido en la sección precedente, en todos los casos a 28°C. Se observa un buen ajuste entre estas dos últimas, con diferencias que prácticamente no superan el 1%.

Parámetro	Celda sin irradiar	Celda irradiada	Factor de degradación	Fluencia equivalente [e/cm <sup>2</sup> ]
$V_{ca}$ [V]	2.622	2.378	0.91	7.50E+14
$I_{cc}$ [A]	0.484	0.470	0.97	7.50E+14
$V_{max}$ [V]	2.330	2.047	0.88	1.80E+15
$I_{max}$ [A]	0.437	0.416	0.95	7.50E+14

Tabla I: Factores de degradación de los parámetros característicos de la celda 35654423A para una fluencia de  $1,0 \times 10^{12} \pm 0,3 \times 10^{12}$  y fluencias equivalentes para cada uno de ellos.

Los factores de degradación de los parámetros característicos de la celda 35654423A para una fluencia de  $1,0 \times 10^{12} \pm 0,3 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup> de protones de 10 MeV están dados en la Tabla I. A modo indicativo, se dan en la misma tabla las fluencias equivalentes de electrones de 1 MeV correspondientes a dichos factores de degradación, según datos provistos por el fabricante.

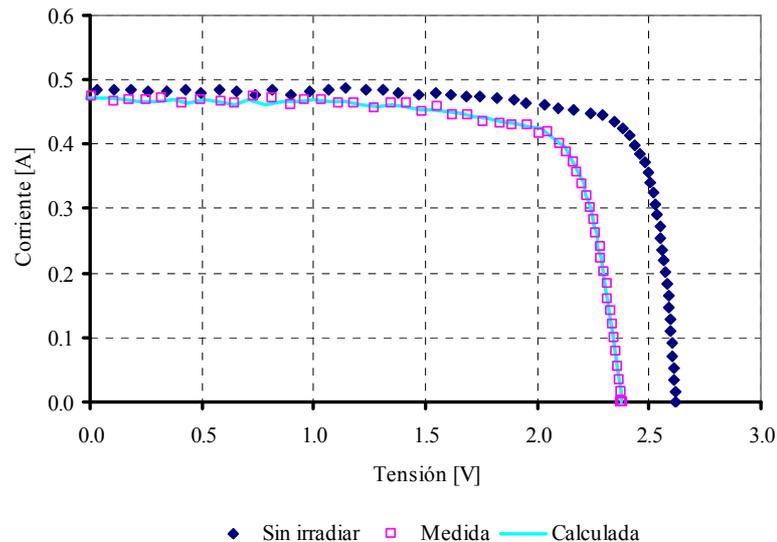


Figura 1: Curvas I-V medidas de la celda 35654423A sin irradiar e irradiada, junto con la curva obtenida para la celda irradiada mediante el algoritmo propuesto.

### Curva I-V de un módulo

Para el caso de los módulos (conjunto de cadenas conectadas en paralelo, con diodos de paso y de bloqueo) debe tenerse en cuenta que los diodos, por ser de distinto material que las celdas, se degradan en forma diferente.

Considerando que cada celda lleva un diodo de paso y que cada cadena lleva un diodo de bloqueo, sería entonces necesario calcular, mediante el algoritmo propuesto, la curva I-V de cada celda irradiada y luego, realizar la interconexión para la obtención de la curva I-V del módulo (Godfrin y Durán, 2002). Los datos para el programa de simulación del funcionamiento del subsistema de potencia del satélite, deberían ser todas las curvas I-V de las celdas y diodos (en lugar de las curvas de los módulos), debiendo realizarse la interconexión de los mismos en cada paso, incrementando notablemente el tiempo de ejecución, la cantidad de operaciones y por consiguiente el error de cálculo.

Dado que no se poseen datos de módulos irradiados, se trabajó con módulos obtenidos a partir de simulaciones. Para facilitar la lectura, de aquí en adelante llamaremos “celdas irradiadas” a las generadas a partir de sus parámetros característicos modificados según la ecuación (1). Tampoco se conocen los factores de degradación de los diodos utilizados, motivo por el cual no se les aplicará degradación alguna. Las curvas I-V de los diodos de paso y de bloqueo son curvas provenientes de mediciones realizadas bajo condiciones normalizadas o datos del fabricante..

Con el objeto de verificar la validez del algoritmo propuesto para el caso de los módulos sin diodos de bloqueo, se realizaron los siguientes pasos:

1. generación de la curva I-V de un módulo sin irradiar, a 28°C, a partir de las curvas I-V de las celdas individuales que lo conforman;
2. cálculo de la curva I-V del módulo irradiado con diferentes fluencias y a diversas temperaturas de operación (50, 60, 70 y 80°C) mediante el algoritmo propuesto;
3. generación de la curva I-V del módulo irradiado con diferentes fluencias y a diversas temperaturas de operación (50, 60, 70 y 80°C) a partir de la interconexión de las curvas I-V de las celdas individuales irradiadas y a dichas temperaturas de operación, sin diodos de bloqueo.

Se aclara que las curvas I-V de las celdas individuales sin irradiar y a 28°C se generan a partir de los parámetros eléctricos característicos de cada celda provistos por el fabricante. En consecuencia, la suma de dichas curvas para generar la curva I-V del módulo (punto 1.) tiene en cuenta, de hecho, el “mismatch” entre las celdas que lo conforman. Por su parte, las curvas I-V de las celdas individuales irradiadas y a temperatura de operación, mencionadas en el punto 3., se obtienen a partir de los mismos parámetros característicos provistos por el fabricante pero corregidos con el factor de degradación por irradiación y con el coeficiente de temperatura. Nuevamente, la interconexión de estas celdas individuales contiene la información del “mismatch” entre las mismas.

En la figura 2 se muestran, a modo de ejemplo, las curvas I-V generadas a partir de celdas sin irradiar y a 28°C, e irradiadas y a 80°C, junto con la curva obtenida mediante la aplicación del algoritmo a la primera. La elección de las curvas correspondientes a los 80°C reside en el hecho que son las que muestran el mayor error. Puede observarse que, salvo en el segundo cuadrante (correspondiente a los diodos de paso de las celdas), se obtiene una buena correlación, con un error inferior al 1%.

A fin de poder utilizar el algoritmo para módulos con diodos de bloqueo, se definió el “diodo de bloqueo equivalente” para el módulo. Dado que los diodos de bloqueo se interconectan en serie con la cadena de celdas solares, las que a su vez se conectan entre sí en paralelo, la curva I-V del “diodo de bloqueo equivalente” se obtiene multiplicando la corriente de la curva I-V del diodo de bloqueo por la cantidad de cadenas en paralelo del módulo. Este diodo equivalente se interconectó a las curvas denominadas “Algoritmo xx” y el resultado se comparó con la curva I-V del módulo generado a partir de las curvas I-V de las celdas individuales irradiadas. En este caso, también se obtuvo una buena aproximación, salvo en el segundo cuadrante.

Finalmente, se trabajó sobre los puntos correspondientes a los diodos de paso de las celdas (segundo cuadrante). Se intentó definir el “diodo de paso equivalente” de manera similar al de bloqueo y, considerando que los de paso se conectan en paralelo a la celda, se multiplicó la tensión de la curva I-V del diodo de paso por la cantidad de celdas en serie de la cadena. La aproximación no fue satisfactoria ya que el diodo equivalente no tiene en cuenta la dispersión en las corrientes de las celdas interconectadas. Se optó entonces por definir como diodo equivalente a la porción de curva que se halla en el segundo cuadrante del módulo sin irradiar y a 28°C, restándole la  $I_{cc}$  del módulo.

En la figura 3 se muestra la comparación entre la la curva irradiada a 80°C, generada con diodos de paso y de bloqueo, y la resultante del siguiente proceso:

1. generación de la curva I-V de un módulo sin irradiar, a 28°C, sin diodos de bloqueo;
2. eliminación de la porción de curva I-V del segundo cuadrante;
3. cálculo de la curva I-V irradiada mediante el algoritmo para los factores de daño por radiación, a 80°C;
4. Interconexión de los diodos de paso equivalentes y de bloqueo equivalentes.

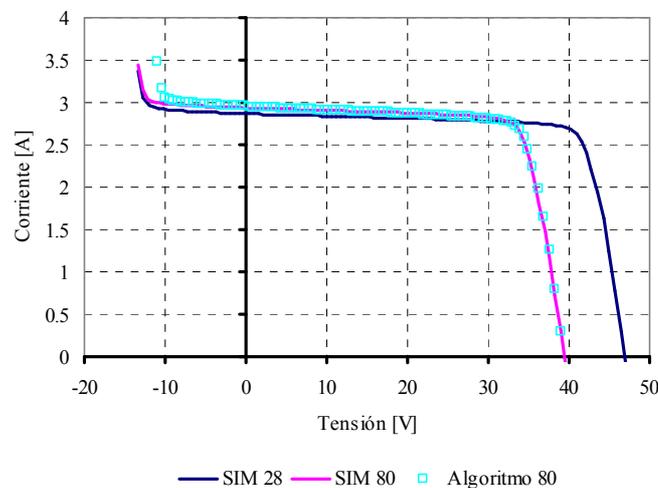


Figura 2: Gráfico de las curvas I-V generadas sin irradiar a 28°C (SIM 28) e irradiada a 80°C (SIM 80), y de la curva obtenida mediante la aplicación del algoritmo a la primera (Algoritmo 80).

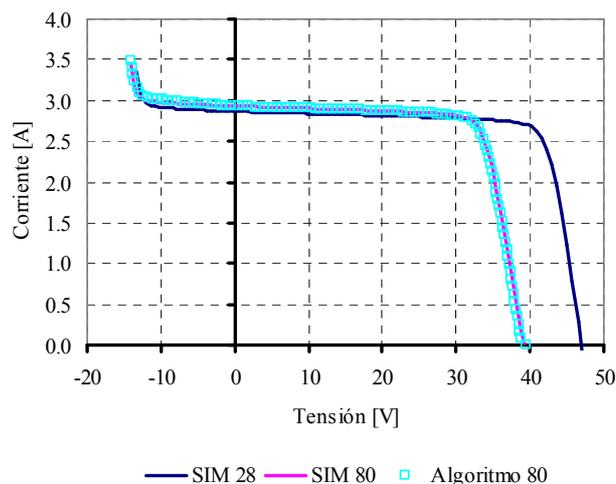


Figura 3 :Gráfico de las curvas I-V irradiada y a 80°C (SIM80) generada con diodos de paso y de bloqueo, y de la curva Algoritmo 80 obtenida mediante la aplicación del algoritmo a la curva del módulo sin irradiar y a 28°C (SIM28).

El mayor error cometido con el algoritmo se encuentra en la zona de los diodos de paso y es del orden de 3,4% en la corriente.

## CONCLUSIONES

Se estableció un algoritmo para la obtención de curvas I-V de celdas y módulos irradiados y sometidos a temperaturas, a partir de los valores de los parámetros característicos (medidos en laboratorio a 28°C) de celdas sin irradiar. Se lo aplicó a celdas ATJ irradiadas en el acelerador TANDAR y a módulos generados a partir de las curvas I-V de celdas ATJ. En el segundo caso, se definieron diodos de paso y de bloqueo equivalentes, de forma tal que se pueda aplicar la degradación correspondiente a cada uno de los componentes. Los resultados obtenidos indican que el algoritmo es una buena aproximación en ambos casos.

## NOMENCLATURA

V	tensión
I	corriente
$V_{ca}$	tensión a circuito abierto
$I_{cc}$	corriente de cortocircuito
$V_{max}$	tensión en el punto de máxima potencia
$I_{max}$	corriente en el punto de máxima potencia
ATJ	Advanced Triple Junction

## REFERENCIAS

- Advanced Triple-Junction (ATJ) High Efficiency Solar Cells for Space Applications (2004), [http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/PhotoV\\_ATJ\\_Prod\\_Sheet.pdf](http://www.emcore.com/assets/photovoltaics/PhotoV_ATJ_Prod_Sheet.pdf)
- Berbeglia G. , Fernández Slezak D. , Godfrin E.M. y Durán J.C. (2003), Simulación del sistema eléctrico de la misión satelital SAOCOM, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7, 08.31.
- Godfrin E.M. y Durán J.C. (2002). Paneles solares para la misión satelital SAOCOM: primeras etapas de diseño, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, 04.19.

## ABSTRACT

In this paper, an algorithm for the attainment of the I-V curves of irradiated cells and modules at actual operating temperatures, using the I-V curves of non-irradiated cell and modules, at 28°C, is presented. The work has been done on advanced triple junction solar cells, for space applications, with 27,5 % mean efficiency. The incorporation of this algorithm in the code for the simulation of the performance of the satellite power subsystem will allow obtaining the temporal evolution of the parameters from BOL to EOL, including intermediate states.

**Keywords:** simulation – solar cells – modules – irradiation – space applications