

Numerical Analysis of Si and GaAs Solar Cells Exposed to Space Radiation

M. A. Cappelletti, *Member*, IEEE, G. Casas, A. P. Cédola, *Member*, IEEE and E. L. P. y Blancá

Abstract— In this paper, we present a study about Si and GaAs space solar cells by means of numerical simulations. We have investigated the variations of the short-circuit current, open circuit voltage and maximum power point, before and after the devices were irradiated with 10 MeV protons and fluences between 10^9 and 10^{13} p⁺/cm². The simulation results allow to obtain the optimum solar cell with specific requirements for space applications.

Keywords— device modeling, numerical simulation, proton radiation effects, solar cells.

I. INTRODUCCIÓN

EN LOS tiempos actuales donde la demanda de energía aumenta de manera continua, el estudio de nuevas tecnologías basadas en energías renovables para producir calor y electricidad [1], en particular sistemas fotovoltaicos y eólicos, se vuelve cada vez más imprescindible. Por ejemplo, en el campo de las aplicaciones espaciales, las celdas solares ofrecen la mejor confiabilidad y relación costo-eficiencia para suministrar potencia eléctrica en satélites [2]-[4].

A su vez, hoy en día, técnicas precisas de modelado y simulación se han convertido en herramientas fundamentales para predecir y mejorar la respuesta de los dispositivos electrónicos frente a diferentes condiciones de operación, y para diseñar dispositivos con requerimientos específicos, ofreciendo conocimientos muy importantes con menores costos y tiempos requeridos que la experimentación.

En este trabajo se presenta un código computacional desarrollado de manera autónoma por los autores, para el análisis numérico en una dimensión de celdas solares bajo diferentes condiciones de operación, incluso permite considerar efectos de radiación espacial. El hecho de contar con una herramienta propia permite libertad para ser modificada y otorga un control total sobre cada una de sus partes.

En la Sección II se describen las características más

Este trabajo fue financiado en parte por la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) (I 158), por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) (PIP 112-201001-00292), y por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) (PICT 2006-2042).

M. A. Cappelletti, Universidad Nacional de La Plata, Argentina y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina., marcelo.cappelletti@ing.unlp.edu.ar

G. Casas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina y Universidad Nacional de Quilmes, Argentina, gcasas@ing.unlp.edu.ar

A. P. Cédola, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, ariel.cedola@ing.unlp.edu.ar

E. L. P. y Blancá, Universidad Nacional de La Plata, Argentina y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina, eitelpyb@ing.unlp.edu.ar

importantes, tanto eléctricas como ópticas, de las celdas solares. Por su parte, en la Sección III se describen los principales aspectos del código de simulación. Se presentan los modelos físicos de los semiconductores, de la tasa de generación óptica para estructuras expuestas a la luz solar y de los daños por efectos de radiación espacial. Luego se detallan las condiciones de contorno consideradas y finalmente, el algoritmo utilizado para calcular la solución del sistema.

Con el propósito de analizar la influencia de la radiación espacial sobre los principales parámetros eléctricos y ópticos de las celdas solares, se llevaron a cabo diferentes simulaciones de celdas solares de silicio (Si) y de arseniuro de galio (GaAs), cuando son irradiadas con protones de 10 MeV y fluencias entre 10^9 y 10^{13} p⁺/cm². En la Sección IV se detallan las características generales de las simulaciones realizadas, mientras que en la Sección V se presentan los resultados obtenidos a partir de las mismas.

II. CARACTERIZACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES

A. Caracterización Eléctrica

Fig. 1 muestra una curva típica de corriente-tensión y otra de potencia-tensión de una celda solar, donde pueden observarse los principales parámetros eléctricos que caracterizan a estos dispositivos. La corriente de corto circuito, I_{SC} , es la corriente obtenida para la condición $V = 0$ y es coincidente con la denominada fotocorriente I_L , definida como la diferencia entre la corriente generada por la celda solar con iluminación y en la oscuridad. Por su parte, la tensión de circuito abierto, V_{OC} , es la tensión obtenida para la condición $I = 0$. Finalmente, la potencia máxima, P_{MPP} , es definida como el producto entre la tensión V_{MPP} y la corriente I_{MPP} , la cual representa el punto óptimo de trabajo.

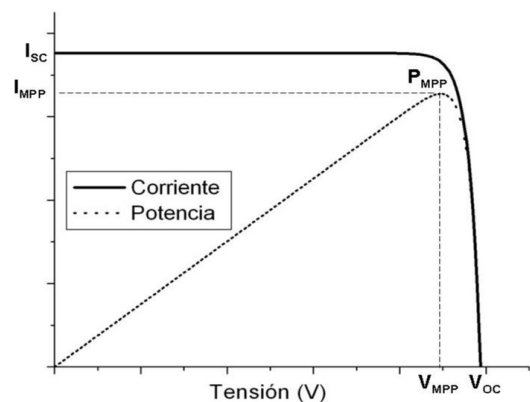


Figura 1. Curvas corriente-tensión y potencia-tensión de una celda solar.

B. Caracterización Óptica

El principal parámetro óptico de las celdas solares es la eficiencia cuántica externa (EQE), la cual describe la sensibilidad del dispositivo a la radiación óptica para diferentes longitudes de onda. EQE es definido como la razón entre el número de pares electrón-hueco que contribuyen a la fotocorriente y el número de fotones incidentes para una dada longitud de onda:

$$EQE = \frac{(J_L / q)}{(P_{opt} / h \nu)} = \frac{(1.243125 \cdot J_L)}{\lambda P_{opt}}, \quad (1)$$

donde J_L es la densidad de fotocorriente en (A/m^2), q es la carga del electrón, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia del fotón, λ es la longitud de onda en (μm) y P_{OPT} es la densidad de potencia óptica en (W/m^2).

III. CÓDIGO DE SIMULACIÓN

A. Modelo Físico de los Semiconductores

El sistema completo a resolver, en estado estacionario y en una dimensión, consiste de tres ecuaciones diferenciales acopladas y no lineales (2), las cuales describen el transporte de carga en los dispositivos semiconductores, la ecuación de Poisson y las ecuaciones de continuidad para e^- y h^+ , donde V es el potencial electrostático, ϵ es la permitividad dieléctrica del material, n y p son las densidades de electrones y huecos, N_D^+ y N_A^- son las concentraciones de impurezas superficiales donoras y aceptoras, n_t y p_t son las concentraciones de electrones y huecos atrapados en niveles permitidos dentro de la banda prohibida y J_n y J_p representan las densidades de corriente de electrones y huecos, respectivamente [5]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2V}{dx^2} &= \frac{q}{\epsilon} \cdot (n - p + N_A^- - N_D^+ + n_t - p_t) \\ \frac{dJ_n}{dx} &= R - G^{OPT} \\ \frac{dJ_p}{dx} &= -(R - G^{OPT}). \end{aligned} \quad (2)$$

Además, R es la tasa neta de recombinación de pares electrón-hueco, la cual incluye los procesos radiativos, Auger, Read-Hall-Shockley e ionización por impacto [6] y G^{OPT} es la tasa de generación óptica debido a iluminación impuesta externamente, detalles de cuyo cálculo serán dados en la siguiente subsección. Los modelos para las densidades de corriente están dados por la suma de los mecanismos de arrastre y difusión:

$$\begin{aligned} J_n &= q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \\ J_p &= q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (3)$$

donde μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y huecos, E es el campo eléctrico y D_n y D_p son los coeficientes de difusión de electrones y huecos, respectivamente.

B. Modelo de la Tasa de Generación Óptica para Estructuras Expuestas a la Luz Solar

Las celdas solares son dispositivos que no son normalmente expuestos a una fuente de luz monocromática con una dada longitud de onda, sino por el contrario, están directamente irradiadas por la luz proveniente del sol, con un amplio rango de longitudes de onda incidentes.

La distribución espectral de la radiación solar es caracterizada mediante el coeficiente de masa de aire AM y es fuertemente dependiente de dos factores, en primer lugar, de la presencia o ausencia de la atmósfera en el camino óptico por el que viaja la luz antes de alcanzar al dispositivo, y en segundo lugar, del ángulo de inclinación de la posición del sol relativo al cenit [5]. De esta manera, las celdas solares empleadas para aplicaciones espaciales, como por ejemplo aquellas utilizadas en satélites de comunicaciones, son caracterizadas con la condición AM0 (atmósfera cero), la cual representa adecuadamente el espectro solar fuera de la atmósfera. Por el contrario, AM1.5 (correspondiente a un ángulo cenital solar de 45°), representa una condición universalmente satisfactoria utilizada para caracterizar las aplicaciones terrestres, donde la radiación solar es atenuada por la presencia de la atmósfera.

El modelo de la tasa de generación óptica para una distancia x debajo de la superficie del semiconductor, para estructuras expuestas a la luz solar, es dado por (4), donde λ es la longitud de onda asociada con cada fotón incidente, $\alpha(\lambda)$ es el coeficiente de absorción, $\beta(\lambda)$ es la eficiencia cuántica (número promedio de pares electrón-hueco creados por cada fotón absorbido), $\Phi_0(\lambda)$ es la distribución del flujo de fotones incidente (en unidades de fotones por unidad de área por unidad de tiempo), y r es el coeficiente de reflexión ($1-r$ es la fracción de fotones que penetran al semiconductor) [7]:

$$G_{OPT}(x) \Big|_{AM0, AM1.5} = \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} \alpha(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot [1-r] \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot x] d\lambda. \quad (4)$$

Assumiendo que cada fotón produce un par electrón-hueco, entonces $\beta(\lambda) = 1$. Valores apropiados de $\alpha(\lambda)$ y $\Phi_0(\lambda)$ fueron extraídos de [5]. A su vez, λ_{MIN} es determinado por el espectro solar ($0.2 \mu m$ para AM0 y $0.3 \mu m$ para AM1.5) mientras que λ_{MAX} , es la mayor longitud de onda correspondiente a la energía de la banda prohibida del semiconductor.

C. Modelo de Daños por Efectos de Radiación Espacial

La degradación de los dispositivos en el ambiente espacial es fuertemente dependiente del tipo y cantidad de energía de la partícula incidente, del tipo de material y resistividad del semiconductor, del tiempo transcurrido luego de la irradiación y de la altitud e inclinación de la órbita donde se encuentra ubicado el dispositivo [8].

La irradiación de partículas de alta energía (protones, electrones, neutrones o iones pesados) produce sobre los dispositivos daños por desplazamiento de átomos [9]. Estos daños son considerados permanentes y pueden ser

modelizados a través del decrecimiento del tiempo de vida de los portadores minoritarios, expresado por [10]:

$$\frac{1}{\tau_\phi} = \frac{1}{\tau_0} + K_\tau \cdot \phi \quad (5)$$

donde τ_0 y τ_ϕ son los tiempos de vida de los portadores minoritarios antes y después de la irradiación, respectivamente, ϕ es la fluencia de partículas acumulada, y K_τ es el coeficiente de daños para el tiempo de vida de los portadores minoritarios. En general, el valor de K_τ está relacionado a electrones de 1 MeV [11], [12] o a protones de 10 MeV [13].

D. Condiciones de Contorno

Fig. 2 muestra un esquema simplificado de una celda solar de estructura n⁺-p-p⁺, similar a la considerada en este trabajo, donde L es el espesor total de la celda solar, y x_F , x_B y x_T son los espesores de las regiones frontal (n⁺), base (p) y trasera (p⁺), respectivamente. El contacto p⁺ está ubicado en $x = 0$, mientras que el contacto n⁺ está situado en $x = L$. Ha sido asumido que tanto los fotones como las partículas espaciales penetran al dispositivo a través de la región frontal.

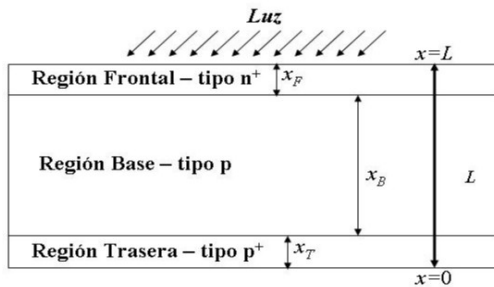


Figura 2. Esquema de la sección transversal de las celdas solares simuladas.

En los bordes, $x = 0$ y $x = L$, han sido impuestas condiciones de Dirichlet para el potencial y las concentraciones de portadores mayoritarios en la superficie (V_S , $n(L)$ y $p(0)$), considerando equilibrio con los electrones en el metal y bajo nivel de inyección. Las concentraciones de portadores minoritarios en la superficie ($n(0)$ and $p(L)$) son calculadas a través de la condición de borde de corriente [14]. El conjunto de ecuaciones (6) y (7) corresponde a los contactos p⁺ y n⁺ respectivamente, donde V_{FINAL} es la tensión final considerada, n_0 y p_0 son las densidades de electrones y huecos en equilibrio termodinámico, S_n y S_p son las velocidades de recombinación superficial para electrones y huecos, n_i es la concentración de portadores intrínseca, T es la temperatura de la red cristalina y k es la constante de Boltzmann.

$$V_S(0) = V(0) + \frac{k.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{p_0(0)}{n_i}\right) \quad (6)$$

$$V(0) = 0$$

$$J_n(0) = q \cdot S_n \cdot (n(0) - n_0(0))$$

$$V_S(L) = V(L) - \frac{k.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{n_0(L)}{n_i}\right) \quad (7)$$

$$V(L) = q \cdot V_{FINAL}$$

$$J_p(L) = q \cdot S_p \cdot (p(L) - p_0(L)),$$

E. Solución Numérica

Un diagrama de flujo del algoritmo utilizado en el código de simulación desarrollado puede observarse en la Fig. 3. En primer lugar se define un dominio de simulación o geometría que representa las dimensiones del dispositivo bajo estudio. Este dominio es dividido en un número finito de subdominios por medio de una malla. Luego se procede a la inicialización de los parámetros relacionados por ejemplo con las características del material semiconductor, las condiciones de operación, etc.

El conjunto de tres ecuaciones básicas del semiconductor (2) es normalizado y discretizado en una malla de puntos de espaciado variable. La discretización es llevada a cabo por medio del método de diferencias finitas, en la cual las densidades de corriente son formuladas utilizando la aproximación de Scharfetter-Gummel [15]. En cada punto de la malla, el potencial electrostático V y las concentraciones de portadores n y p , son calculados iterativamente por medio del método de Gummel, el cual es capaz de converger aún partiendo de estimaciones iniciales no muy cercanas con respecto a las soluciones verdaderas [16]. Este método mejora sucesivamente las incógnitas V , n y p en una manera autoconsistente, resolviendo para cada iteración las ecuaciones de Poisson y continuidad de forma separada, e introduciendo en cada paso la solución obtenida en el paso previo. Modelos físicos de tasas de recombinación/generación y movilidad de portadores son actualizados después de cada iteración.

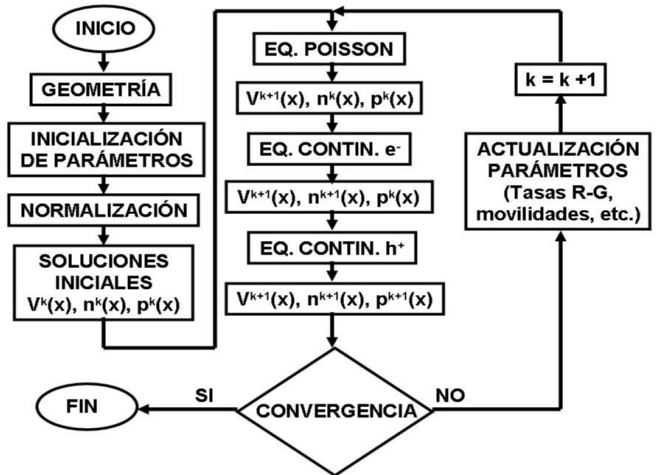


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el código de simulación desarrollado.

IV. CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES

A partir de la herramienta de simulación desarrollada, han sido analizadas celdas solares de Si y de GaAs, de estructura

n^+p-p^+ , bajo condiciones AM1.5 ($P_{IN} = 1000 \text{ W/m}^2$) y AM0 ($P_{IN} = 1353 \text{ W/m}^2$), expuestas a la irradiación de protones de 10 MeV, con fluencias entre 10^9 and $10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Las características constructivas de ambas celdas fueron similares: área activa de 100 cm^2 y espesor de $50 \mu\text{m}$, con $x_F = 0.1 \mu\text{m}$, $x_B = 48.9 \mu\text{m}$ y $x_T = 1 \mu\text{m}$; perfiles uniformes de impurezas con valores de 10^{19} cm^{-3} para los átomos donores en la región frontal (tipo- n^+) y de 10^{17} cm^{-3} para los átomos aceptores en la región posterior (tipo- p^+); resistividad de la región base de $1 \Omega\cdot\text{cm}$, lo cual equivale a una concentración de átomos aceptores (tipo-p) de $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ para Si y de $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ para GaAs; velocidad de recombinación superficial de 100 cm/s para la región frontal (superficie pasivada) y de 10^6 cm/s para la región trasera; tiempo de vida de portadores minoritarios antes de la irradiación de protones de $30 \mu\text{s}$.

Utilizando en (5) valores de $K_\tau = 1.52 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ para Si [13], y de $K_\tau = 1.49 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ para GaAs [17], han sido simuladas diecisiete fluencias diferentes de protones de 10 MeV en el rango de $10^9 - 10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ seleccionando el correspondiente valor del tiempo de vida posterior a la irradiación τ_0 . K_τ puede considerarse constante a lo largo del dispositivo para cada material. Esto es debido a que la irradiación de protones de 10 MeV que impactan de manera normal sobre un cuerpo de Si o de GaAs alcanzan una profundidad de $708 \mu\text{m}$ y $427 \mu\text{m}$ respectivamente [18], valores suficientemente mayores al espesor total de los dispositivos simulados ($50 \mu\text{m}$).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis Numérico de las Características Eléctricas

Las Figs. 4 y 5 muestran la degradación con la radiación de protones de 10 MeV, de la curva densidad de corriente-tensión, para diferentes fluencias, para las celdas solares de Si y de GaAs previamente descritas, respectivamente. Por claridad, solo unas pocas curvas son graficadas.

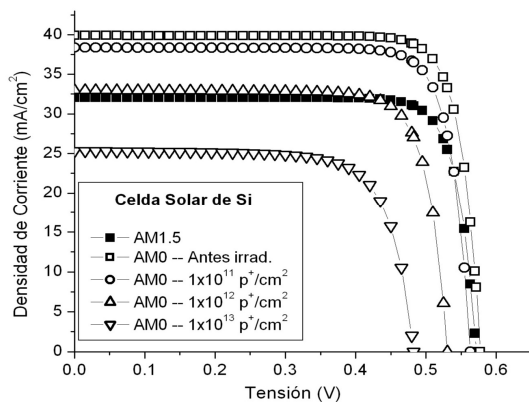


Figura 4. Característica densidad de corriente-tensión de una celda solar de silicio bajo efectos de radiación espacial, para condición AM0.

En ambas figuras, las curvas con símbolos vacíos corresponden a las celdas solares utilizadas para aplicaciones espaciales, caracterizadas con el espectro AM0, mientras que

por propósitos comparativos, han sido agregadas las curvas con símbolos llenos, las cuales representan a las celdas solares utilizadas para aplicaciones terrestres bajo irradiancia AM1.5.

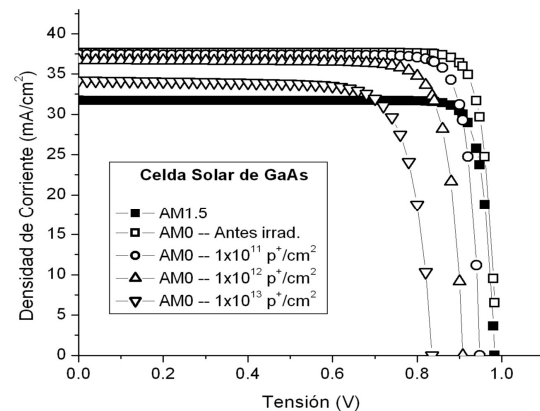


Figura 5. Característica densidad de corriente-tensión de una celda solar de arseniuro de galio bajo efectos de radiación espacial, para condición AM0.

La tabla I muestra los valores de J_{SC} , V_{OC} y P_{MPP} obtenidos para ambas celdas solares para dos condiciones diferentes: cuando los dispositivos no son irradiados y luego de que alcancen la máxima fluencia de protones considerada. También se presenta el porcentaje de daño que sufren los parámetros estudiados con respecto a sus valores iniciales.

TABLA I
PARÁMETROS ELÉCTRICOS ANTES Y DESPUÉS DE LA MAYOR FLUENCIA DE PROTONES CONSIDERADA EN LAS SIMULACIONES

CELDA SOLAR DE SI			
Parámetros Eléctricos	Sin Radiación	$1 \times 10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$	Degradación (%)
$J_{SC} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	39.88	25.32	~ 36.5
$V_{OC} \text{ (V)}$	0.58	0.48	~ 17
$P_{MPP} \text{ (mW/cm}^2\text{)}$	18.93	9.06	~ 52

CELDA SOLAR DE GAAS			
Parámetros Eléctricos	Sin Radiación	$1 \times 10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$	Degradación (%)
$J_{SC} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	37.65	34.18	~ 9
$V_{OC} \text{ (V)}$	0.99	0.87	~ 12
$P_{MPP} \text{ (mW/cm}^2\text{)}$	32.77	22.37	~ 32

Puede ser visto que P_{MPP} es claramente el parámetro más afectado debido a los protones incidentes para ambas celdas solares, reduciendo sus valores iniciales en ~ 52% y ~ 32% para las celdas solares de Si y de GaAs, respectivamente. Por su parte, en el caso de la celda solar de Si, V_{OC} es el parámetro menos alterado (~ 17%). Una situación diferente ocurre con la celda solar de GaAs, donde el parámetro menos afectado por la incidencia de protones es J_{SC} (~ 9%). Los resultados obtenidos están en concordancia con datos experimentales publicados en [13], [19] para las celdas solares de Si y en [20] para las celdas de GaAs. En el rango de fluencias de protones considerado, menor o igual a $10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, la degradación que sufren los parámetros eléctricos es causada por centros de

recombinación inducidos por la radiación de protones [21].

Fig. 6 muestra la variación de J_{SC} , V_{OC} y P_{MPP} para las celdas solares de Si y GaAs, en función de la fluencia de protones. Los valores están normalizados a aquellos correspondientes a la condición de no irradiación.

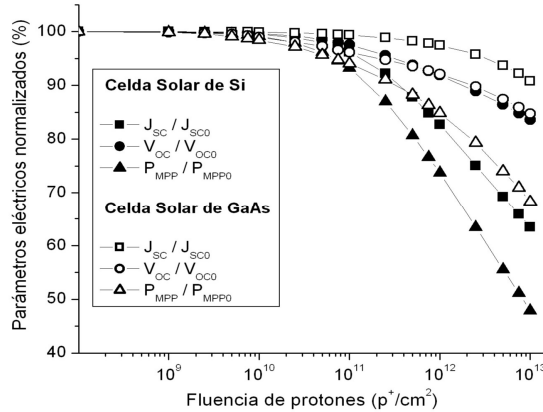


Figura 6. Degradación de los parámetros eléctricos de una celda solar de Si y de GaAs expuestas a irradiación de protones.

Estas curvas son muy útiles para determinar las fluencias de protones máximas para las cuales los parámetros eléctricos de las celdas solares se degradan solo un 10 o 20% de sus valores iniciales pre-irradiación. Estas fluencias son denominadas por los autores como ϕ_{90} y ϕ_{80} respectivamente. Dado que P_{MPP} es el parámetro más afectado para ambas celdas, alcanza con analizar únicamente a este parámetro. La tabla II presenta estas fluencias umbrales para las celdas de Si y de GaAs. Por ejemplo, para la celda solar de Si, el análisis numérico indica que hasta la fluencia $\phi_{90} = 1.71 \times 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$, J_{SC} , V_{OC} y P_{MPP} son mantenidos simultáneamente por encima del 90% de sus valores previos a la irradiación de protones.

TABLA II
FLUENCIAS LÍMITES PARA LAS CUALES LA POTENCIA MÁXIMA ES IGUAL AL 90 Y 80% DE SU VALOR INICIAL

	P_{MPP}/P_{MPP0} (Si)	P_{MPP}/P_{MPP0} (GAAS)
ϕ_{90} (p^+/cm^2)	1.71×10^{11}	3.42×10^{11}
ϕ_{80} (p^+/cm^2)	5.66×10^{11}	2.18×10^{12}

En consecuencia, si se conoce previamente la ubicación orbital de los dispositivos (altitud e inclinación) conjuntamente con el flujo de protones allí presente, el disponer de estas fluencias límites, ϕ_{90} y ϕ_{80} , permitirá determinar el máximo tiempo de exposición a la radiación para evitar una dada degradación de los parámetros eléctricos de los dispositivos.

Este interesante resultado sobre minimización de daños por radiación en dispositivos semiconductores complementa una lista de trabajos previos publicados por los autores [22]-[25].

B. Análisis Numérico de la Eficiencia Cuántica Externa

El análisis de EQE representa un medio espectroscópico para estudiar la manera en la cual los efectos de la radiación

espacial degradan la J_{SC} para cada longitud de onda.

Se puede apreciar en la Fig. 7 la gráfica de EQE para las celdas solares de Si y GaAs, antes y después de la irradiación de protones de 10 MeV, para la fluencia de $10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Puede observarse una gran diferencia entre las curvas sin irradiación para ambos materiales. La celda solar de GaAs absorbe únicamente hasta longitudes de onda inferiores a 900 nm, mientras que para el dispositivo de Si, el rango de absorción de fotones es mayor, dado que longitudes de onda cercanas a 1100 nm también contribuyen a la fotocorriente.

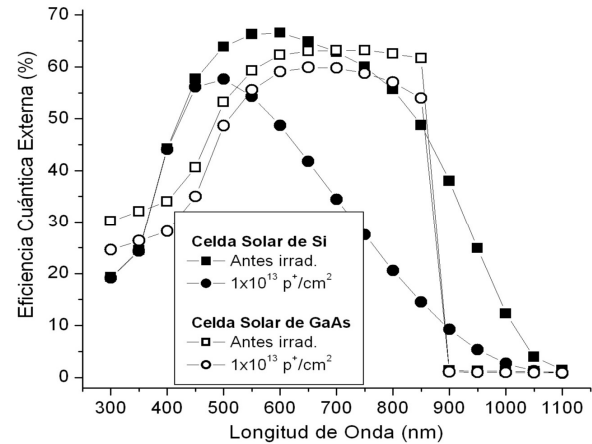


Figura 7. Eficiencia cuántica externa de una celda solar de Si y de GaAs, antes y después de ser expuestas a irradiación de protones de 10 MeV.

Las longitudes de ondas límites de 1100 y 900 nm para las celdas solares de Si y de GaAs, respectivamente, son debido a la incapacidad del material semiconductor en absorber fotones con energías inferiores a la energía de la banda prohibida (1.12 eV para el Si y 1.424 eV para el GaAs).

Una vez que los dispositivos han sido expuestos a la irradiación de protones, queda en evidencia que la celda solar de Si es claramente más afectada que la celda solar de GaAs.

Los resultados de la simulación muestran que para la celda solar de Si, el efecto de los protones comienza a ser observado para longitudes de onda por encima de 450 nm. A partir de este valor, EQE disminuye fuertemente con el aumento de la longitud de onda. Por el contrario, la celda solar de GaAs es afectada por la radiación de protones de manera casi constante a lo largo de todo el espectro de longitudes de onda.

VI. CONCLUSIÓN

El código computacional desarrollado ha sido utilizado para determinar de manera rápida y precisa el comportamiento de celdas solares bajo dos diferentes condiciones de operación, antes y después que los dispositivos sean irradiados con protones de 10 MeV y fluencias entre 10^9 y $10^{13} \text{ p}^+/\text{cm}^2$. Los parámetros eléctricos y ópticos más importantes de celdas solares de Si y de GaAs han sido investigados a partir de esta herramienta. Los resultados obtenidos se encuentran en muy buena concordancia con datos experimentales publicados previamente en la literatura científica, lo cual permite validar

la precisión de los modelos implementados en el código de simulación. La celda solar de Si es ciertamente más dañada por la radiación que la de GaAs. Además, P_{MPP} se degrada un 52% (Si) y un 32% (GaAs) respecto de sus valores pre-irradiación, siendo claramente el parámetro más afectado debido a los protones incidentes. Como consecuencia de este estudio, ha sido posible calcular las fluencias de protones máximas para las cuales los parámetros eléctricos de los dispositivos se mantienen simultáneamente por encima del 90 y 80% de sus valores iniciales. Esto permite determinar el máximo tiempo de exposición a la radiación para evitar una dada degradación de J_{SC} , V_{OC} y P_{MPP} . Finalmente, a partir de E_{QE} se pudo observar que por efecto de la radiación de protones, la celda solar de Si reduce fuertemente su capacidad para absorber fotones para longitudes de onda mayores que 450 nm.

REFERENCIAS

- [1] G. Boyle, *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*, 2nd edition, Oxford University Press, 2004.
- [2] M. Alurralde, "Method using the primary knock-on atom spectrum to characterize electrical degradation of monocrystalline silicon solar cells by space protons," *J. Appl. Phys.*, vol. 95, pp. 3391-3396, 2004.
- [3] A. Khan, *et al.*, "Strategies for improving radiation tolerance of Si space solar cells," *Solar En. Mater. & Sol. Cells*, vol. 75, pp. 271-276, 2003.
- [4] J. J. Lee, *et al.*, "Space radiation effect on Si solar cells," *Journal of Astronomy & Space Sciences*, vol. 25, pp. 435-444, 2008.
- [5] S. M. Sze, and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd edition, New York: Wiley & Sons, 2007.
- [6] S. Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [7] J. G. Fossum, "Computer-aided numerical analysis of silicon solar cells," *Solid-State Electronics*, vol. 19, pp. 269-277, 1976.
- [8] E. G. Stassinopoulos, and J. P. Raymond, "The space radiation environment for electronics," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76 (11), pp. 1423-1442, 1988.
- [9] J. R. Srouf, C. J. Marshall, and P. W. Marshall, "Review of displacement damage effects in silicon devices," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 50, pp. 653-670, 2003.
- [10] M. Yamaguchi, *et al.*, "A detailed model to improve the radiation-resistance of Si space solar cells," *IEEE Trans. Elect. Devices*, vol. 46, pp. 2133-2138, 1999.
- [11] A. Khan, *et al.*, "Strategies for improving radiation tolerance of Si space solar cells," *Solar En. Mater. & Sol. Cells*, vol. 75, pp. 271-276, 2003.
- [12] B. Danilchenko, *et al.*, "1 MeV electron irradiation influence on GaAs solar cell performance," *Solar Energy Mater. & Sol. Cells*, vol. 92, pp. 1336-1340, 2008.
- [13] M. Alurralde, *et al.*, "Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells," *Solar En. Mater. & Sol. Cells*, vol. 82, pp. 531-542, 2004.
- [14] I. Tobías, A. Luque, and A. Martí, "Numerical modeling of intermediate band solar cells," *Semic. Sci. Technol.*, vol. 26, 014031 (8 pp.), 2011.
- [15] D. Scharfetter, and H. Gummel, "Large-signal analysis of a silicon read diode oscillator," *IEEE Trans. Elect. Devices*, vol. 16, pp. 64-77, 1969.
- [16] H. Gummel, "A self-consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations," *IEEE Trans. Elect. Devices*, vol. 11, pp. 455-465, 1964.
- [17] S. I. Sato, *et al.*, "Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated with various-energy protons," *Solar Energy Mater. & Sol. Cells*, vol. 93, pp. 768-773, 2009.
- [18] J. F. Ziegler, SRIM-2008, *The Stopping and Range of Ions in Matter*. Available: <http://www.srim.org>
- [19] Y. Morita, *et al.*, "Anomalous degradation in silicon solar cells subjected to high-fluence proton and electron irradiations," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, pp. 6491-6493, 1997.
- [20] T. V. Torchynska, and G. P. Polupan, "III-V material solar cells for space application," *Semic. Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 5, pp. 63-70, 2002.
- [21] M. Imaizumi, *et al.*, "Mechanism for the anomalous degradation of Si solar cells induced by high-energy proton irradiation," *Solar En. Mater. & Sol. Cells*, vol. 50, pp. 339-344, 1998.
- [22] M. A. Cappelletti, U. Urcola, and E. L. Peltzer y Blancá, "Radiation-damaged simulation PIN photodiodes," *Semicond. Science Technol.*, vol. 21, pp. 346-351, 2006.
- [23] M. A. Cappelletti, A. P. Cédola, and E. L. Peltzer y Blancá, "Simulation of silicon PIN photodiodes for use in space-radiation environments," *Semicond. Science Technol.*, vol. 23, 025007 (7 pp.), 2008.
- [24] M. A. Cappelletti, A. P. Cédola, and E. L. Peltzer y Blancá, "Theoretical study of neutron effects on PIN photodiodes with deep-trap levels," *Semicond. Science Technol.*, vol. 24, 105023 (7 pp.), 2009.
- [25] A. P. Cédola, M. A. Cappelletti, G. Casas, and E. L. Peltzer y Blancá, "An iterative method applied to optimize the design of PIN photodiodes for enhanced radiation tolerance and maximum light response," *Nuclear Inst. and Met. A*, vol. 629, pp. 392-395, 2011.



Marcelo A. Cappelletti (M²⁰⁰⁶) was born in Mendoza, Argentina, in 1974. He received the B.S. degree in Electronic Engineering and the Ph.D. degree in Engineering from UNLP, La Plata, Argentina, in 2002 and 2009, respectively. His research interests include semiconductor device physics and nanotechnology applications.



Guillermo A. Casas was born in La Plata, Argentina, in 1958. He received the B.S. degree in Telecommunications Engineering from UNLP, La Plata, Argentina, in 1983. His specific research interest is the theoretical study of radiation effects in solar cells.



Ariel P. Cédola (M²⁰⁰⁴) was born in Berisso, Argentina, in 1975. He received the B.S. degree in Electronic Engineering from UNLP, La Plata, Argentina, in 2002. He is currently pursuing the Ph.D. degree in Engineering at UNLP and at Politecnico di Torino, Turin, Italy. His research interests involve study of semiconductor devices and nanostructures, in particular heterostructures and quantum dots based photonic devices.



Eitel L. Peltzer y Blancá was born in La Plata, Argentina, in 1951. He received the B.S. degree in Physics and the Ph.D. degree in Physics from UNLP, La Plata, Argentina, in 1976 and 1985, respectively. His research interests are the electronic properties of solids and the study of physics properties of electronic devices.