

Estudio Basado en Algoritmos Genéticos de Celdas Solares Expuestas a Radiación

D. Martín Morales^{#*1}, Marcelo Cappelletti^{#&}, Guillermo Casas^{&%}, Waldo Hasperué^{#+}, Eitel Peltzer y Blancá[&]

[#] *Instituto de Ingeniería y Agronomía, Universidad Nacional Arturo Jauretche (IIyA, UNAJ)
Av. Calchaquí 6200, Florencio Varela (1888), Buenos Aires, Argentina*

¹ martin.morales@unaj.edu.ar

^{*} *Laboratorio de Ingeniería en Sistemas de Información (LINES),
Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional (UTN, FRLP)*

[&] *Grupo de Estudio de Materiales y Dispositivos Electrónicos (GEMyDE),
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)*

[%] *Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), Buenos Aires, Argentina*

⁺ *Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI),
Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata (UNLP)*

Abstract— The electrical parameters degradation of n-type GaAs solar cells exposed to radiation from high-energy particles has been analyzed by means of computer simulation. Specifically, the radiation damage caused by electron upon the diffusion and recombination currents and the series resistance of the solar cells with different base carrier concentrations have been researched using the NRL method, the PC1D program and a home-made numerical code based on genetic algorithms. Results obtained are useful to predict the behavior of these devices under extreme operating conditions.

Resumen— La degradación de parámetros eléctricos de celdas solares de GaAs tipo n sometidas a la irradiación de partículas de alta energía ha sido estudiada por medio de herramientas computacionales. Específicamente, se han investigado los daños por radiación de electrones sobre las corrientes de difusión y recombinación y la resistencia serie para celdas solares con diferentes concentraciones de portadores en la región base, utilizando el método NRL, el programa PC1D y un código numérico hecho por los autores basado en algoritmos genéticos. Los resultados obtenidos son útiles para predecir el comportamiento de estos dispositivos bajo condiciones extremas de funcionamiento.

I. INTRODUCCIÓN

Dos de los problemas más substanciales que se presentan a nivel mundial en la actualidad son la gran polución ambiental acumulada y la disminución de los recursos naturales de fuentes de energía no renovables (carbón, petróleo, gas natural). Por esta razón, la conversión de energía a través de fuentes de energía renovable y no contaminante se ha tornado un tema trascendente en pos de resolver estos inconvenientes. En este sentido, los dispositivos fotovoltaicos tales como las celdas solares, constituyen hoy en día ideales candidatos con el fin de aprovechar el gran potencial de energía solar disponible para generar energía de forma “limpia” y eficiente para aplicaciones domésticas, industriales y en vehículos espaciales.

El funcionamiento de las celdas solares se basa en el efecto fotoeléctrico para convertir la energía lumínica proveniente del sol directamente en electricidad sin pasar por un ciclo térmico, es decir que pueden proveer energía eléctrica casi permanentemente a un bajo costo operativo. Deben su aparición fundamentalmente a la industria

aeroespacial, y hoy en día se han convertido en el medio más fiable de suministrar energía eléctrica a un satélite o a una sonda en las órbitas interiores del Sistema Solar. Esto es gracias a la mayor irradiación solar allí presente y a su bajo peso. Sin embargo, los dispositivos utilizados en misiones espaciales se encuentran expuestos a un ambiente de radiación compuesto por diferentes tipos de partículas, tales como electrones, protones y neutrones, sobre un amplio rango de energía, las cuales degradan el comportamiento de los dispositivos [1,2]. Comprender la respuesta a la radiación de celdas solares sometidas a partículas cargadas de alta energía es un tema extremadamente importante para poder efectuar predicciones precisas sobre la degradación de sus parámetros al final de su vida útil [3].

Uno de los métodos más utilizados en la actualidad para predecir la degradación de una celda solar en el ambiente espacial es el método NRL o también llamado método de dosis de daño por desplazamiento [4], desarrollado en el US Naval Research Laboratory, el cual incluye daños por electrones y protones de cualquier energía. En este método, se determina la dependencia de los coeficientes de daño por radiación con la energía de la misma a partir del cálculo de la pérdida de energía no ionizante (NIEL - Non-Ionizing Energy Loss), la cual hace referencia a la tasa de pérdida de energía causada por desplazamientos atómicos cuando electrones o protones atraviesan un cierto material. Una característica de este método es que requiere de una cantidad mínima de mediciones experimentales para describir la respuesta de la celda solar, en general dos energías para electrones y una para protones. Como resultado de aplicar el método NRL, el conjunto de datos medidos colapsan en una única curva característica, a partir de la cual se puede predecir el rendimiento de la celda solar para cualquier energía.

El presente trabajo tiene por objetivo el estudio de la respuesta a la radiación de diecinueve celdas solares de GaAs tipo n, irradiadas con electrones de 1 y 5 MeV de energía. Las celdas solares de GaAs son quienes limitan la resistencia a la radiación de las celdas solares de triple junta de InGaP/GaAs/Ge, las cuales hasta el momento han demostrado tener la mayor eficiencia de conversión al comienzo de la vida útil [5]. En particular, se investigaron los daños por radiación en la corriente de difusión (I_{01}), en

la corriente de recombinación (I_{02}) y en la resistencia serie (R_s) como una función de la concentración de portadores en la región base (N_B), utilizando el método NRL, conjuntamente con el programa simulador de dispositivos ópticos PC1D [6] y un código numérico hecho por los autores basado en algoritmos genéticos.

La modelización y la simulación numérica se han convertido actualmente en etapas indispensables a la hora de estudiar cualquier tipo de sistema. Esto es consecuencia no solamente del vertiginoso incremento en la velocidad y capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos que presentan las computadoras actuales, sino también del perfeccionamiento de precisos y eficientes métodos numéricos.

II. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CELDA SOLAR

El análisis de las celdas solares requiere de un profundo conocimiento de los aspectos teóricos concernientes a sus propiedades de interés y a los parámetros que gobiernan los cambios de dichas propiedades. Su comportamiento puede ser descrito a partir de modelos matemáticos formulados a través de ecuaciones, cuyas incógnitas representan las magnitudes de interés. En este sentido, para predecir el comportamiento de una celda solar real bajo diferentes condiciones de funcionamiento, y por lo tanto, poder generar las curvas características corriente-tensión (I - V) y potencia-tensión (P - V), es necesario utilizar un modelo de un circuito eléctrico equivalente del dispositivo.

Una celda solar ideal está representada por una fuente de corriente que modeliza la fotocorriente I_{ph} generada por la luz incidente proveniente de la radiación solar. En una celda solar real, el comportamiento de la fotocorriente generada se desvía del comportamiento ideal debido a pérdidas ópticas y eléctricas dentro del dispositivo. Para considerar estos efectos, y con el objetivo de estudiar el comportamiento de una celda solar bajo diferentes condiciones de operación, el circuito eléctrico equivalente más comúnmente utilizado es el modelo de doble diodo, el cual cuenta con dos diodos de juntura p-n conectados en paralelo con la fuente de corriente generada por la luz, como se puede observar en la Figura 1 [7].

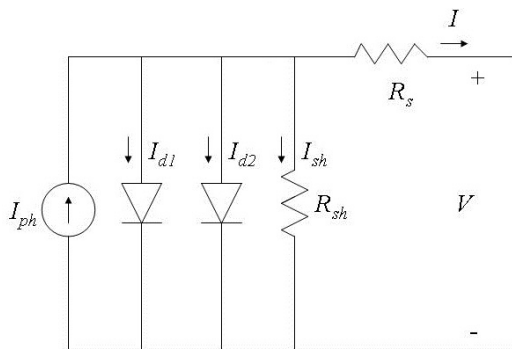


Fig. 1. Circuito eléctrico equivalente de dos diodos de una celda solar.

Las corrientes a través del primer y segundo diodo, I_{d1} e I_{d2} , representan las corrientes debido a la difusión en las regiones neutras y a la recombinación en la región de carga espacial, respectivamente. Por su parte, R_s es la resistencia serie, la cual representa la resistencia en el camino de la corriente debido a los contactos óhmicos y a las regiones

base y emisor. Mientras que R_{sh} es la resistencia paralela o resistencia shunt, quien representa la corriente de fuga a través de la juntura p-n de la celda solar. Finalmente, I y V son la corriente de salida y la tensión de salida de la celda solar, respectivamente, las cuales están relacionadas entre sí a través de la siguiente ecuación:

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_1 kT} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_2 kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

donde I_{sh} es la corriente por la resistencia shunt, I_{01} e I_{02} son las corrientes de saturación inversa de los diodos 1 y 2 debido a la difusión y recombinación respectivamente, n_1 y n_2 son los factores de idealidad de difusión y recombinación del diodo respectivamente, q es la carga del electrón, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura en kelvin.

La ecuación (1) es una ecuación trascendente que no puede resolverse de manera analítica, sino que se hacen necesarios métodos numéricos. En los últimos años se ha comenzado a utilizar técnicas subsimbólicas de la inteligencia artificial, como algoritmos genéticos, los cuales constituyen herramientas poderosas para resolver tal ecuación y obtener soluciones muy aproximadas a las soluciones exactas.

En este trabajo, para comprender el desempeño de una celda solar bajo diferentes condiciones de operación, se ha utilizado un código numérico basado en algoritmos genéticos, completamente desarrollado por los autores, implementado con la herramienta de software matemático Matlab, con el propósito de extraer los parámetros de la ecuación (1), tales como I_{ph} , I_{01} , I_{02} , R_s , R_{sh} , n_1 y n_2 , a partir de la curva característica I - V de las celdas solares de interés en este estudio.

III. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los Algoritmos Genéticos (AG) son una de las técnicas incluidas en el campo denominado Inteligencia Artificial Computacional o Subsimbólica. La técnica de AG pertenece a la familia de la computación evolutiva y se destaca por ser una técnica con alta performance, confiabilidad, robustez y capacidad de búsqueda global [8,9]. Estos algoritmos son metaheurísticos poblacionales que siguen un proceso evolutivo donde cada individuo de la población es una posible solución al problema. Los algoritmos genéticos son modelos computacionales que imitan el proceso de evolución biológica para la resolución de problemas en un amplio dominio utilizando como criterio la supervivencia de los individuos más aptos. Esta técnica es capaz de encontrar correlaciones entre datos diversos, y tiene el potencial para realizar mejores, más rápidas y más prácticas predicciones que cualquier otro método tradicional.

Partiendo de una población inicial de individuos, cada uno de los cuales está conformado por un cromosoma y representa una posible solución al problema, en cada etapa el algoritmo aplica operadores genéticos con el objetivo de ordenar y seleccionar a los mejores individuos.

La población actual de soluciones produce los hijos para la próxima etapa del algoritmo por medio de operadores de

reproducción, denominados cruce (crossover) y mutación. Los individuos son seleccionados de a pares para realizar un cruce entre ellos, el cual consiste en el intercambio de parte de sus cromosomas dando lugar así a nuevos individuos, estos a su vez pueden resultar en individuos más aptos que aquellos que los originaron. Para indicar cuan buena es la solución que representa un individuo debe medirse su aptitud (fitness) con algún criterio que es dependiente del problema. Por lo tanto, la población inicial converge a la solución óptima luego de sucesivas generaciones.

Previa a la utilización de los algoritmos genéticos se deben decidir ciertos aspectos en la implementación, los cuales consisten en:

- **Representación.** El cromosoma de cada individuo se representa como una secuencia de bits (ceros o unos) de una determinada longitud (representación binaria).
- **Función de fitness.** Es una función que evalúa la aptitud de un individuo cuantificando la solución que representa de manera relativa al óptimo que pueda alcanzarse, por lo general, estas funciones resultan en maximizar o minimizar algún criterio.
- **Generación inicial de los individuos.** Los cromosomas pueden ser armados completamente al azar o bien usarse soluciones conocidas.
- **Criterio de selección.** Es el criterio de seleccionar dos individuos para realizar un crossover. La idea es que cada individuo tenga más posibilidades de ser elegido en función de su fitness.
- **Crossover.** Es el mecanismo por el cual se lleva a cabo el cruce de los individuos seleccionados. Por lo general, dos individuos intercambian sus cromosomas dando otros dos individuos como resultado. Los individuos resultantes pueden ser igual, más o menos aptos de aquellos que los originaron.
- **Criterio de fin.** El algoritmo puede terminar luego de un número máximo de iteraciones o cuando la mejor solución hallada es aceptable para el problema planteado.

IV. DETALLE DE LAS SIMULACIONES

En este estudio, ha sido llevado a cabo un análisis de celdas solares de GaAs tipo n con un área de $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$, bajo el espectro solar AM0. La concentración de la región base (N_B) ha sido el parámetro variable para diecinueve diferentes niveles de contaminación, que van desde 1.00×10^{15} hasta $1.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. En todos los casos fueron considerados perfil de dopado gaussiano. Las estructuras completas simuladas (regiones, concentración de portadores y espesores) son detalladas en la Tabla 1.

TABLA I
ESTRUCTURA DEL DISPOSITIVO UTILIZADO EN ESTE ESTUDIO

Región	Concentración de portadores (cm^{-3})	Espesores (μm)
Contacto p^+	1.00×10^{19}	0.18
Ventana AlGaAs	2.00×10^{18}	0.03
Emisor tipo p	3.85×10^{17}	0.48
Base tipo n	N_B , Variable	2.85
Buffer n^+	3.12×10^{17}	0.54
Sustrato n	4.52×10^{18}	2.00

La implementación de algoritmos genéticos utilizada en este trabajo está basada en las siguientes consideraciones:

- Se utilizó una representación binaria donde cada variable a ajustar (I_{ph} , I_{01} , I_{02} , R_s , R_{sh} , n_1 y n_2) se representó con 32 bits dando un cromosoma de 224 bits. Cada variable se ajustó dentro de su propio rango.
- Para la función de fitness se utilizó la ecuación (2), expresada como:

$$f(I_{ph}, I_{01}, I_{02}, R_s, R_{sh}, n_1, n_2) = I_{ph} - I - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh}$$

$$= I_{ph} - I - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_1 kT} \right] - 1 \right\}$$

$$- I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_2 kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

La solución óptima es alcanzada cuando

$$f(I_{ph}, I_{01}, I_{02}, R_s, R_{sh}, n_1, n_2) = 0$$

Los valores resultantes se sumaron al cuadrado y se tomó la raíz cuadrada como fitness del individuo.

- Los individuos iniciales fueron seleccionados al azar y la población inicial está conformada por 200 individuos.
- El criterio de selección es el de la ruleta que consiste en seleccionar un individuo en una cantidad proporcional a su fitness. Se utilizó elitismo de un individuo, es decir, en cada generación el mejor individuo pasa a la siguiente.
- El crossover es de un punto con probabilidad 0.75. También se utilizó mutación sobre los individuos resultantes en cada generación con probabilidad 0.001.
- El algoritmo genético se ejecutó 500 generaciones.

Los datos de entrada para el algoritmo genético son un conjunto de valores de las curvas I-V obtenidas desde las simulaciones del software PC1D.

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo del algoritmo de búsqueda genética implementado en este trabajo.

BÚSQUEDA GENÉTICA

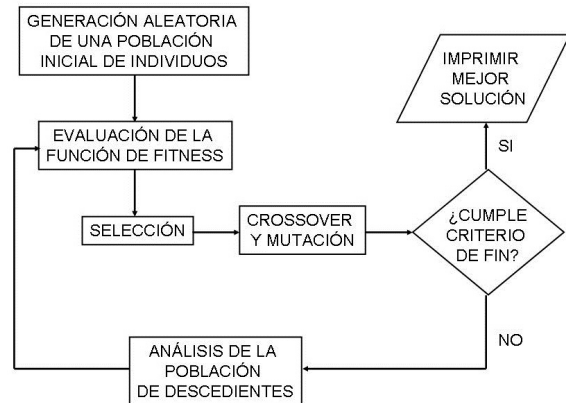


Fig. 2. Diagrama de flujo del algoritmo genético.

V. RESULTADOS

Resultados obtenidos de la degradación de I_{01} , I_{02} y R_s después de exponer la celda solar a la irradiación de electrones de alta energía son mostrados en la Figura 3, para la celda solar detallada en la Tabla 1 con $N_B = 3.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Las curvas con símbolos llenos y vacíos corresponden a electrones con energías de 1 y 5 MeV respectivamente.

Los valores presentados están normalizados a aquellos correspondientes a los dispositivos no irradiados, los cuales son $\sim 7.2 \times 10^{-11}$ A, $\sim 3.4 \times 10^{-6}$ A y $\sim 1.6 \Omega$, para I_{01} , I_{02} y R_s , respectivamente.

Se puede observar en la Figura 3 que para fluencias inferiores a 10^{16} cm^{-2} se obtiene un incremento abrupto en la corriente de difusión (cercano a 18 veces) y un incremento gradual en la corriente de recombinación (cercano a 2.4 veces) y en la resistencia serie (cercano a 1.7 veces). Estos efectos pueden conducir a fallas severas de las celdas solares.

También es posible observar en la Figura 3 que cuando la fluencia de electrones se incrementa entonces la energía de los electrones disminuye para un dado nivel de degradación en los parámetros I_{01} , I_{02} y R_s , indicando que los electrones con más alta energía provocan mayor daño a los dispositivos. Sin embargo, la degradación de I_{01} , I_{02} y R_s , para electrones con diferentes energías puede ser correlacionada utilizando el concepto de dosis de daño por desplazamiento (método NRL) como se analiza a continuación.

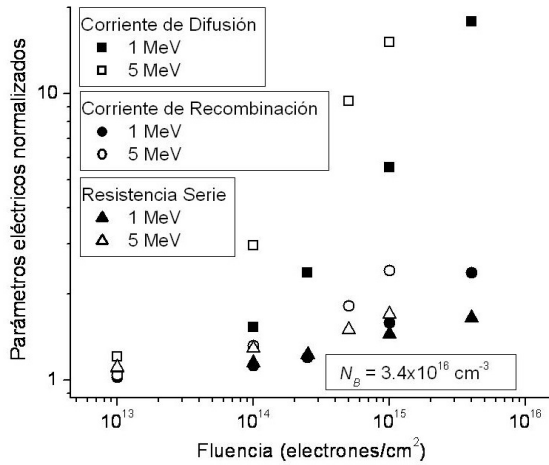


Fig. 3. Parámetros eléctricos normalizados (I_{01} , I_{02} , R_s) como una función de la fluencia de electrones para 1 y 5 MeV sobre la celda solar de GaAs tipo n descrita en la Tabla 1 con $N_B = 3.4 \times 10^{16}$ cm^{-3} .

En la Figura 4, se puede observar el mismo conjunto de datos presentados en la Figura 3, pero ahora siendo el eje de las abscisas la dosis de daño por desplazamiento en lugar de la fluencia de electrones. La dosis de daño por desplazamiento $D_d(E)$ se define como:

$$D_d(E) = \phi(E) \cdot S(E) \quad (3)$$

donde $\phi(E)$ es la fluencia de electrones, $S(E)$ es el valor de NIEL correspondiente a la partícula incidente, su energía y al material de la celda solar. Los valores de NIEL para GaAs utilizados en este trabajo fueron 2.656×10^{-5} y 7.182×10^{-5} $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ para electrones de 1 y 5 MeV, respectivamente [4].

Se puede apreciar en la Figura 4 que los valores normalizados de I_{01} , I_{02} y R_s , para las dos energías no colapsan en una única curva. Por lo tanto, con el objetivo de reducir el conjunto de datos de la Figura 3 a una simple curva característica, se debe utilizar la dosis efectiva de daño por desplazamiento $D_{eff}(E)$. El método NRL consiste en seleccionar una energía de electrones particular para

definir una dosis de referencia, la cual es usualmente elegida como 1 MeV. La dosis efectiva de daño por desplazamiento resultante para 1 MeV $D_{eff}(1 \text{ MeV})$ es definida por:

$$D_{eff}(1 \text{ MeV}) = D_d(E) \cdot \left(\frac{S(E)}{S(1 \text{ MeV})} \right)^{(n-1)} \quad (4)$$

donde $S(1 \text{ MeV})$ es el NIEL para la energía de referencia elegida. El exponente n toma en cuenta la dependencia no lineal del NIEL y es determinado a través de un ajuste de mínimos cuadrados de la ecuación (4) para dos o más energías de electrones.

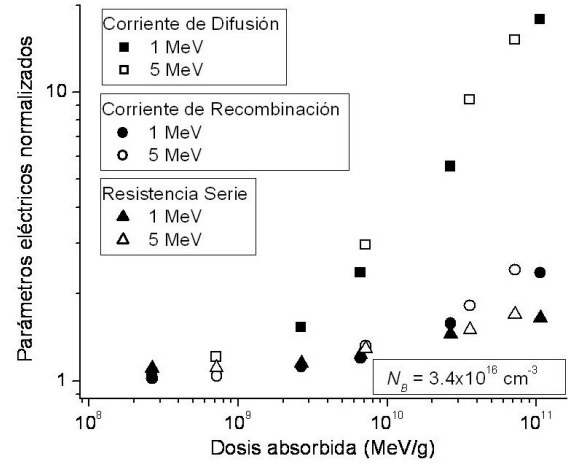


Fig. 4. Parámetros eléctricos normalizados (I_{01} , I_{02} , R_s) como una función de la dosis de daño por desplazamiento sobre la celda solar de GaAs tipo n descrita en la Tabla 1 con $N_B = 3.4 \times 10^{16}$ cm^{-3} . El conjunto de datos es similar al de la Fig. 3.

Si los datos normalizados mostrados en la Figura 4 son graficados en función de la dosis efectiva de daño por desplazamiento dada por la ecuación (4), para valores de n de 1.22; 1.39 y 1.41 para I_{01} , I_{02} y R_s , respectivamente, los valores para cada parámetro colapsan en una única curva característica que contiene información de la degradación de I_{01} , I_{02} y R_s para todas las energías (Figura 5). Repitiendo este procedimiento sobre los restantes dispositivos considerados en este trabajo, variando desde $N_B = 1.00 \times 10^{15}$ hasta $N_B = 1.00 \times 10^{17}$ cm^{-3} , las curvas colapsadas de cada uno de los parámetros eléctricos (I_{01} , I_{02} y R_s) han sido obtenidas con los mismos valores de n anteriormente mencionados. La ecuación (5), obtenida a partir de un ajuste sigmoideal del conjunto total de curvas, es propuesta para describir la degradación inducida por radiación en la corriente de difusión, la corriente de recombinación y la resistencia serie.

$$M(E) = \frac{1 - C}{1 + (D_{eff}(E) / D_x)^p} + C \quad (5)$$

donde $M(E)$ representa el parámetro normalizado de interés: I_{01} , I_{02} y R_s después de exponer el dispositivo a una dada dosis de electrones, mientras C , D_x y p son parámetros de ajuste.

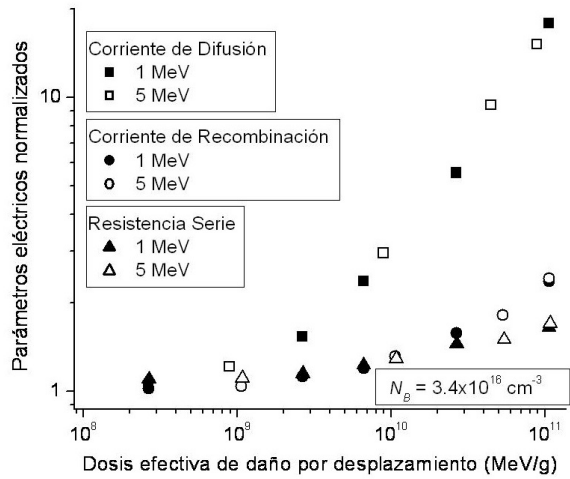


Fig. 5. Parámetros eléctricos normalizados (I_{01} , I_{02} , R_s) como una función de la dosis de daño por desplazamiento efectiva de electrones de 1 MeV sobre la celda solar de GaAs tipo n descrita en la Tabla 1 con $N_B = 3.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Mismo conjunto de datos mostrado en las Fig. 3 y Fig. 4.

Si se fijan los valores de C en 150, 10 y 3 para I_{01} , I_{02} y R_s respectivamente, mientras que los valores de D_x de la ecuación (5) se mantienen fijos en $1 \times 10^{12} \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1}$ para los tres parámetros eléctricos, los resultados obtenidos para la variación del parámetro p con N_B es mostrado en la Figura 6. Sólo unos pocos valores son graficados en esta figura por razones de claridad. Estas curvas pueden ser utilizadas para predecir la resistencia a la radiación de celdas solares expuestas a electrones de cualquier energía.

A partir de la ecuación (5), si los valores de C y D_x son considerados fijos, la mejor condición para lograr la menor degradación en los parámetros I_{01} , I_{02} y R_s se obtiene para los mayores valores de p . Por lo tanto, de acuerdo a los resultados de la Figura 6, para ambas corrientes, I_{01} y I_{02} , el mejor comportamiento se obtiene cuando se considera la más alta concentración de portadores en la base, mientras que para la resistencia R_s , la menor degradación es alcanzada para los valores más pequeños de N_B .

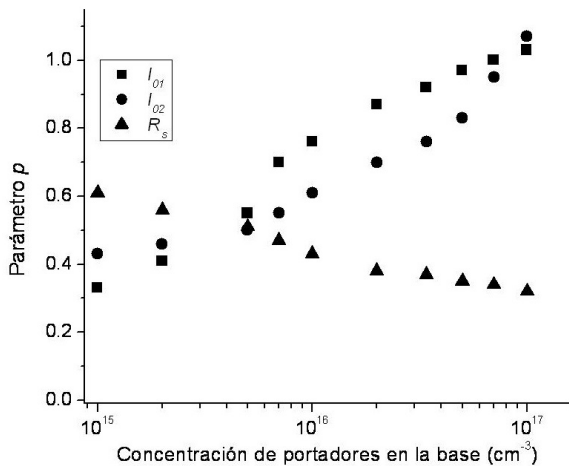


Fig. 6. Variación en el parámetro p de la ecuación (5) para los tres parámetros eléctricos (I_{01} , I_{02} , R_s) como una función de la concentración de portadores en la base tipo n.

VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo ha sido presentado el estudio de los efectos de la irradiación de electrones sobre celdas solares de GaAs tipo n, bajo el espectro solar AM0, con diferente concentración de portadores en la región base. La respuesta a la radiación de los parámetros eléctricos de los dispositivos bajo estudio ha sido analizada en detalle utilizando el método de dosis de daño por desplazamiento, conjuntamente con el programa simulador de dispositivos ópticos PC1D y un código numérico hecho por los autores basado en algoritmos genéticos. Los resultados obtenidos permiten cuantificar la degradación que sufren las corrientes de difusión y de recombinación y la resistencia serie con la irradiación de electrones sobre un amplio rango de energías, en función de uno de los parámetros de diseño más importantes de las celdas solares, tal como la concentración de portadores de la región base. Estos resultados contribuyen al diseño de dispositivos resistentes a la radiación con el fin de aumentar su tiempo de vida útil cuando están expuestos a una misión espacial.

REFERENCIAS

- [1] C. Claeys and E. Simoen, *Radiation Effects in advanced Semiconductor Materials and Devices*, Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [2] E. R. Benton and E. V. Benton, "Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, vol. 184, pp. 255-294, 2001.
- [3] G. Xin *et al.*, "Performance Evaluation and Prediction of Single-Junction and Triple-Junction GaAs Solar Cells Induced by Electron and Proton Irradiations," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* vol. 61, pp. 1838-1842, 2014.
- [4] G. P. Summers *et al.*, "A new approach to damage prediction for solar cells exposed to different radiations," *IEEE Proc. 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 2068-2075, 1994.
- [5] L. Ming *et al.*, "Displacement damage dose approach to predict performance degradation of on-orbit GaInP/GaAs/Ge solar cells," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, vol. 307, pp. 362-365, 2013.
- [6] D. Clugstone and P. Basore, "PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers," in *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anaheim, California, 1997, pp. 207-210.
- [7] M. Wolf, G. T. Noel, R. J. Stirn, "Investigation of double exponential in the current-voltage characteristics of silicon solar cells," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 24, pp. 419-28, 1997.
- [8] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, The MIT Press, 1999.
- [9] T. Back, D. Fogel and Z. Michalewicz, *Evolutionary Computation 2: Advanced Algorithms and Operators*, Bristol, U.K.: Institute of Physics, 2000.