

## Comparativa de resistencia oscura vs factor de relleno con doble contacto para mejorar la eficiencia en celdas fotovoltaicas BC-BJ.

### Comparison of dark resistance vs. fill factor with double contact to improve efficiency in BC-BJ photovoltaic cells.

Alfonso Gunsha-Morales<sup>1</sup>[0000-0002-1485-1522], Jorge Murillo<sup>2</sup>[0000-0001-6812-0795], Paola Proaño<sup>3</sup>[0000-0001-9201-5768]

<sup>1</sup>Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador  
<sup>1</sup>{agunsham, jmurillo, pproanom}@uteq.edu.ec

#### CITA EN APA:

Gunsha Morales, A., Murillo Oviedo, J., & Proaño Molina, P., (2022). Comparativa de resistencia oscura vs factor de relleno con doble contacto para mejorar la eficiencia en celdas fotovoltaicas BC-BJ. *Tesla Revista Científica*, 3(1), e113.  
<https://doi.org/10.55204/trc.v3i1.e113>

**Recibido:** 20 de Octubre 2022  
**Revisado:** 01-25 de noviembre 2022  
**Corregido:** 29 de noviembre  
**Aceptado:** 06 de diciembre 2022  
**Publicado:** 11 de diciembre 2022

TESLA  
Revista Científica  
ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)  
Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

Resumen. El mejoramiento de la eficiencia en celdas fotovoltaicas en la actualidad ha ido incrementando en función de la construcción de nuevos elementos para optimizar el uso de la energía solar, sin embargo, nunca ha sido objeto de estudio los factores que contribuyen la disminución de la eficiencia, ni las medidas para contrarrestar las pérdidas ocasionadas por la resistencia oscura que se genera por un segundo contacto en. En el presente trabajo se usa el método experimental para la demostración del mejoramiento de la eficiencia con un segundo contacto móvil en el emisor y así se identifica el incremento del rendimiento en cada posición que se va moviendo en la parte inferior de la celda, encontramos que alcanza un mejoramiento de la eficiencia en una celda solar más alta de 22.109% (distancia 500  $\mu\text{m}$ ,  $J_{sc} = 40.25 \text{ mA} / \text{cm}^2$ ,  $V_{oc} = 673 \text{ mV}$ ,  $FF = 81.618\%$ ,  $R_s \text{ DARK} = 0,13064$ ) en el caso del contacto 100  $\mu\text{m}$ , de la misma manera se grafica en un sistema de referencia en función de la resistencia oscura y el factor de relleno donde encontramos el problema que se generan al cambiar de posición el contacto lo cual ocasiona disminución en la eficiencia, por esta razón se concluye que al incrementar un segundo contacto en el emisor el cual se va moviendo en cada posición la resistencias parasitas tienden a aumentar y genera una disminución en el factor de relleno, el presente trabajo plantea disminuir los problemas en las resistencias oscuras que se generan.

**Palabras Clave:** FF (Factor de Relleno), BC-BJ (Contacto Bajo – Contacto Unión), Eficiencia (n), Resistencia Serie Oscura ( $R_s \text{ DARK}$ )

**Abstract.** The improvement of efficiency in photovoltaic cells has been increasing in function of the construction of new elements to optimize the use of solar energy, however, the factors that contribute to the decrease in efficiency have never been studied, nor have the measures to counteract the losses caused by the dark resistance generated by a second contact. In this paper we use the experimental method to demonstrate the improvement of efficiency with a second moving contact in the emitter and thus identify the increase in performance at each position that is moving at the bottom of the cell, we discovered that in the case of the 100 m contact, it achieves an efficiency improvement of 22.109% (distance 500 m,  $J_{sc} = 40.25 \text{ mA} / \text{cm}^2$ ,  $V_{oc} = 673 \text{ mV}$ ,  $FF = 81.618\%$ ,  $R_s \text{ DARK} = 0.13064$ ). Similarly, it is plotted in a reference system as a function of dark resistance and fill factor where we find the problems that are generated by changing the position of the contact, which causes a decrease in efficiency, therefore it is concluded that by increasing a second contact in the emitter which is moving in each position the parasitic resistances tend to increase and generate a decrease in the fill factor, the present work proposes to reduce the problems in the dark resistances that are generated.

**Keywords:** FF (Fill Factor), BC-BJ (Back Contact – Back Junction), Efficiency (n), Resistance Dark series ( $R_s \text{ DARK}$ )

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la utilización de la energía solar como fuente de energía renovable [1] el sol continuamente produce 390 sextillones ( $390 \times 10^{21}$ ) kilovatios de potencia. A medida que el sol emite energía en todas las direcciones, esta energía tiende a ser perdida por diversos factores, y así toda la tierra recibe más de 1,500 cuatrillones ( $1,5 \times 10^{18}$ ) kilovatios-hora de potencia por año.

Este potencial es alto y sustancialmente inutilizable, casi todas las fuentes de energía hidroeléctrica, la biomasa, el viento y la energía de los combustibles fósiles en los océanos son formas indirectas de energía solar.

Estas son algunas ventajas del uso de energía renovable (en nuestro caso se refiere a la energía del sol)

- Aumentar el número y el suministro de energía.
- No son fuentes limitadas.
- Asegurar la sostenibilidad y la renovación de recursos.
- Reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos.
- Económicamente viable y abundante (Finder, 2011).

Es la fuente de casi toda la energía en la tierra y de los cuales se hace uso de este importante suministro de energía, así como animales y plantas. Usan la energía que nos proporciona el sol para la calefacción, la comida y aprovechar los beneficios que ofrece esta fuente principal de energía.

Del mismo modo, también, la energía renovable es la energía que nos da el sol y es utilizada por los humanos de varias maneras para dar el mejor uso posible y aprovechar al máximo esta fuente de energía ilimitada. Aquí algunos ejemplos:

Como fuente de calor.

Energía hidroeléctrica que depende de la evaporación del agua a través de la energía solar, y su retorno a la tierra como lluvia para cubrir el requerimiento de represas de agua.

Generar electricidad a través de células fotovoltaicas que convierten la misma radiación solar en electricidad (Honsberg Christiana, 2013), la mayor parte de la energía utilizada en todo el mundo proviene de la quema de gas natural, carbón, petróleo o madera. Esta energía proviene del sol, incluso para la energía hidroeléctrica, en el caso de las energías renovables como la generada por paneles fotovoltaicos o energía eólica.

Por lo tanto, para comprender la generación de energía, primero debemos observar la fuente de toda energía en el caso de que la energía la proporcione el sol. El sol se convierte en energía mediante la fusión de masa, el sol es tan caliente que todos los átomos están completamente ionizados, principalmente los isótopos de hidrógeno y helio.

**Absorción en la atmósfera:** La energía de una molécula de gas puede existir en muchas formas:

- La energía de traslación es la energía debida al movimiento del centro de masa de la molécula.
- La energía de rotación es la energía debida a la rotación de la molécula alrededor de un eje que pasa por su centro de masa.
- La energía vibratoria es la energía debida a la vibración de los átomos de los compuestos de una molécula en su equilibrio.
- La energía electrónica se debe a los estados de energía de los electrones de la molécula.

Las últimas tres formas de energía pueden cambiar solo en una cantidad discreta conocida como energía de transición. Un fotón de radiación electromagnética puede ser absorbido por una molécula cuando su frecuencia coincide con una de las energías de transición disponibles.

- Absorción ultravioleta
- Capa de ozono
- Región Visible
- Absorción Infrarroja
- Región de Microondas (Honsberg Christiana, 2013).

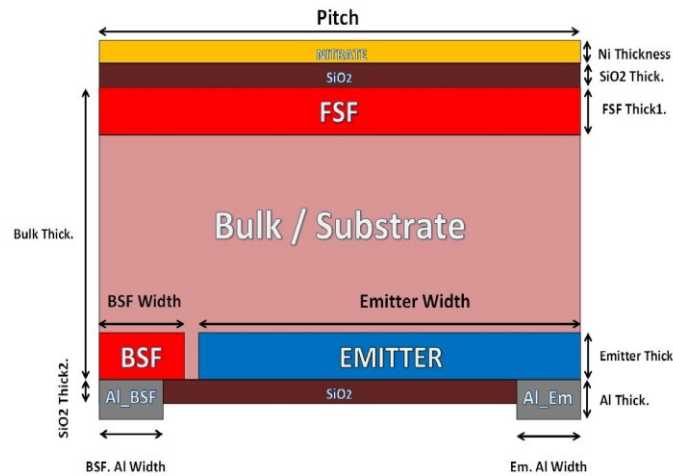
**Dispersión de luz de rayo:** Cuando se presenta longitud de onda comparable a la masa del tamaño de las partículas, la luz está sujeta a otro efecto importante causado por la dispersión de las moléculas de la atmósfera.

Tal fenómeno tiene mucho éxito en longitudes de onda cortas los rayos de la dispersión resultante de la componente difusa de la luz, también llamada componente indirecta. La razón por la que el cielo es azul es que la contribución a la componente difusa proviene de las longitudes de onda azules (las más cortas del espectro visible); porque la luz directa se ve privada de la parte azul del espectro visible del sol parece ser amarillo.

Efectos de dispersión adicionales entre partículas de polvo y aerosoles. En un día despejado se difunde el 10% de la luz incidente, mientras que la intensidad aumenta significativamente en los componentes difusos de los días nublados (Shaw).

El objetivo de este trabajo incluye otro contacto de 50  $\mu\text{m}$  y de 100  $\mu\text{m}$  en el emisor de una celda fotovoltaica Back Contact – Back Junction BC-BJ que va comparando la eficiencia en distintas posiciones en el simulador SENTAURUS DEVICE posteriormente compara cuál de los dos contactos es más eficiente y no me provoca pérdidas por medio de las resistencias parasitas, en la figura 1 presenta el modelo de una celda fotovoltaica con un contacto en el emisor como cada uno de sus elementos que conforman esta celda solar.

**Figura. 1** celda Fotovoltaica Back Contact – Back Junction BC-BJ.



Fuente: Autor

## 2. METODOLOGÍA

### *Simulación Numérica.*

SENTAURUS DEVICE, es un simulador numérico de Synopsys tiene un entorno de software capaz de simular el comportamiento eléctrico, térmico y óptico de los dispositivos semiconductores. Especial se da énfasis a la descripción de los modelos físicos y eléctricos (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010).

El modelado y la simulación de dispositivos de circuitos integrados (CI) es una fase integral de investigación y desarrollo que minimiza las etapas de fabricación y procesamiento que desarrolla el modelo conceptual representativo del dispositivo.

Los modelos dentro SENTAURUS DEVICE debe ser cuidadosamente seleccionada, con su gran base de datos de parámetros de material, tiene varios modelos físicos que elige para la simulación de los materiales semiconductores más importantes.

Las simulaciones (de una, dos o tres dimensiones) suelen utilizar varias herramientas de SENTAURUS que comunica a través de archivos de entrada / salida. Todas las propiedades o características de tensión, tiempos de vida del portador, campos eléctricos, etc, son importantes para cada uno de los modelos de SENTAURUS DEVICE (Alex Walker, 2010).

### *Editor de estructura SENTAURUS.*

Crea arquitecturas 2D y 3D por medio de formas básicas como rectángulos, cuboides, círculos y cilindros y para definir diferentes regiones.

Resuelve las ecuaciones del modelo de difusión de deriva (DRIFT-DIFFUSION) por el simulador eléctrico, el dominio de simulación discretiza por medio de una malla, a fin de generar dicha malla, dispositivo SENTAURUS produce los archivos de entrada necesarios junto con el POISSON y las ecuaciones de continuidad de una manera óptima.

Para cada región, los materiales constitutivos y los perfiles de dopaje se definen en el modelo.

El perfil de dopaje puede ser constante, analítico o generado externamente, las regiones de contacto eléctrico se formula de la siguiente forma.

Input files

\*.tdr

\*.dat

Output files

The grid file:

- grid\_mesh.tdr

The data file:

- grid\_mesh.dat

Incluye información sobre: la estructura principal, el perfil de dopaje y el refinamiento de la malla (SYNOPTSYS, 2011)

### ***SENTAURUS DEVICE.***

El flujo de proceso general para simular un SENTAURUS DEVICE se da a continuación.

- Construye la estructura del dispositivo
- Construye las mallas
- Simula el dispositivo
- Muestra los resultados

### ***Simulación eléctrica.***

La estadística de FERMI se aplica a partículas idénticas con spin es una propiedad física de las partículas elementales por el cual tiene un momento angular intrínseco de valor fijo en un sistema en equilibrio termodinámico. Además, se supone que las partículas en este sistema tienen interacción mutua insignificante. Esto permite que el sistema de muchas partículas se describa en términos de estados de energía de una sola partícula. El resultado es la distribución de partículas en estos estados e incluye la condición de que no dos partículas pueden ocupar el mismo estado, lo que tiene un efecto considerable en las propiedades del sistema.

***Las estadísticas BOLTZMANN*** utiliza una concentración de portadores de Silicio la cual es menor que  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , pero si las concentraciones de portadores son mayores de  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  usa las estadísticas de FERMI-DIRAC. En el software SENTAURUS DEVICE, las densidades de portadores se calculan mediante los potenciales Quasi-Fermi de los huecos y electrones, utiliza las estadísticas de BOLTZMANN. Las densidades de portadores de electrones y huecos, se calcula mediante las siguientes ecuaciones (SYNOPTSYS, 2011) (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010) (P.P. Altermatt, J.O. Schumacher, A. Cuevas, M.J. Kerr, S.W. Glunz, R.R. King, G. Heiser, A. Schenk, 2002)::

$$n = N_C e^{\left(\frac{E_{F,n} - E_C}{kT}\right)} \quad (1)$$

$$p = N_V e^{\left(\frac{E_V - E_{F,p}}{kT}\right)} \quad (2)$$

donde:

- $N_C$  y  $N_V$  son la densidad de estados efectivos para la banda de conducción y valencia.
- $E_{F,n} = -q\Phi_n$  y  $E_{F,p} = -q\Phi_p$  son las energías Quasi-Fermi para huecos y electrones.
- $\Phi_n$  y  $\Phi_p$  son los potenciales Quasi-Fermi para huecos y electrones.
- $E_C$  y  $E_V$  son las energías de borde de las bandas de conducción y valencia.

Recombinación SHOCKLEY-READ-HALL (SRH) está a través de niveles profundos de defectos en el espacio en el SENTAURUS DEVICE se implementa la siguiente forma: (SYNOPSIS, 2011) (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010) (P.P. Altermatt, J.O. Schumacher, A. Cuevas, M.J. Kerr, S.W. Glunz, R.R. King, G. Heiser, A. Schenk, 2002):

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (3)$$

$$n_1 = n_{i,eff} e^{\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right)} \quad (4)$$

$$p_1 = n_{i,eff} e^{\left(\frac{-E_{trap}}{kT}\right)} \quad (5)$$

$$n_i^2 = n_1 p_1 \quad (6)$$

donde:

- $n_{i,eff}$  es la concentración de portadores intrínsecos efectiva.
- $E_{trap}$  es la diferencia entre el nivel de defecto y el nivel intrínseco.
- $\tau_p, \tau_n$  tiempo de vida de los portadores mayoritarios y de los portadores minoritarios.

Las celdas solares BC-BJ produce a partir de obleas de silicio en la zona flotante de tipo n, con un dopaje dependiente de los tiempos de vida SRH (Jan Schmidt and Armin G Aberle, 1997). La ecuación de SCHARFETTER determinada por la ecuación (7) calcula la dependencia de dopaje en el software *SENTAURUS DEVICE* (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010) (Altermatt, 2011). En el Silicio se dopa con aluminio, la disminución de los tiempos de vida atribuye a un integrado complejo defecto altamente recombinado activo de oxígeno de aluminio (Schmidt J., Thiemann N., Bock R. and Brendel R., 2009). Por lo tanto, aumenta la densidad de corriente inicial con la cual se mide el BSF (*BACK SURFACE FIELD*) de la aleación de Aluminio (Altermatt P.P., Dreissigacker S., Yang Y., Sprodowski C., Dezhdar T., Koc S., Veith B., Herrman S., Bock R., Bothe K. Schmidt J., Brendel R., 2009) (M. Rüdiger, M. Rauer, C. Schmiga and M. Hermle, 2011) (R. Bock, P.P. Altermatt, J. Schmidt, R. Brendel, 2010).

$$\tau_{SRH,dop} = \tau_{min} + \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\gamma}} \quad (7)$$

donde:

- $\gamma$  y  $N_{ref}$  son parámetros de ajuste.
- $\tau_{max}$  and  $\tau_{min}$  son los tiempos de vida máximo y mínimo.
- $N_A$  and  $N_D$  son los niveles receptores y donantes del *bulk*.

### **Recombinación AUGER**

La tasa de recombinación AUGER banda a banda es determinada por la ecuación (8), la cual se usa en el SENTAURUS DEVICE (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010). Esta ecuación es calculada por las densidades de electrones y huecos junto con los coeficientes dependientes de la temperatura, expresados en las ecuaciones (10) y (11) (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010).

$$R_{Auger} = (C_n n + C_p p)(pn - n_{i,eff}^2) \quad (8)$$

Donde:

- $C_n$  y  $C_p$  son coeficientes dependientes de la temperatura para electrones y huecos (L. Huldt, N. G. Nilsson, and K. G. Svantesson, 1979) (W. Lochmann and A. Haug, 1980) (Häcker Rolf, Hangleiter Andreas, 1994).

$$n_{i,eff} = n_i e^{\frac{E_{bgn}}{2kT}} \quad (9)$$

Donde:

- $E_{bgn}$  estrechamiento de la banda prohibida.

$$C_n(T) = \left( A_{A,n} + B_{A,n} \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_{A,n} \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 \right) \left[ 1 + H_n e^{\left( -\frac{n}{N_{0,n}} \right)} \right] \quad (10)$$

$$C_p(T) = \left( A_{A,p} + B_{A,p} \left( \frac{T}{T_0} \right) + C_{A,p} \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 \right) \left[ 1 + H_n e^{\left( -\frac{p}{N_{0,p}} \right)} \right] \quad (11)$$

donde:

- $T_0$  es igual a 300 K,
- $A_A$ ,  $B_A$  y  $C_A$  son los parámetros específicos del material para electrones y huecos, and
- $H$  utiliza en el modelado empíricamente de los coeficientes Auger a niveles de inyección altos basados en la concentración de dopaje referencial  $N_0$ .

Las densidades de portadores altas portadores altas son importantes en el uso de recombinación AUGER, por lo tanto en las celdas solares al dopar, el valor de la densidad esta obtenida inferior a  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  (Altermatt, 2011). También, a densidades de soporte aproximadamente inferiores a  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ , los pares de electrón-hueco son menos eficientes debido a

la disminución de electrones y huecos, por lo que hace aumentar los  $C_n$  y  $C_p$  (Häcker Rolf, Hangleiter Andreas, 1994) (Haouari-Merbah M., Belhamel M., Tobias I. and Ruiz J., 2005).

### ***Recombinación SUPERFICIAL***

Cuando la recombinación superficial se establece por la velocidad de recombinación superficial (SRV), calculada por la ecuación (12). La velocidad de recombinación superficial en el software Sentaurus Device se calcula por la ecuación (13) (Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010, 2010).

$$R_{surf,SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\frac{(n + n_1)}{s_p} + \frac{(p + p_1)}{s_n}} \quad (12)$$

Donde  $s_n$  y  $s_p$  son las velocidades de recombinación superficial dependientes del dopaje para electrones y huecos, respectivamente.

$$s = s_0 \left[ 1 + s_{ref} \left( \frac{N_i}{N_{ref}} \right)^\gamma \right] \quad (13)$$

donde  $s_0$ ,  $s_{ref}$ ,  $N_{ref}$  y  $\gamma$  son parámetros ajustables del modelo y  $N_i$  indica la concentración de dopaje en la interfaz.

### ***Movilidad de los portadores.***

Utiliza el modelo Philips de movilidad unificada en el software SENTAURUS DEVICE, propuesto por KLAASSEN, integra las características de portadores de mayoría y minoría, añade la detección de las impurezas por portadores de carga, la dispersión electrón-hueco, agrupación de impurezas y la dependencia de temperatura de la movilidad (Klaassen, 1992).

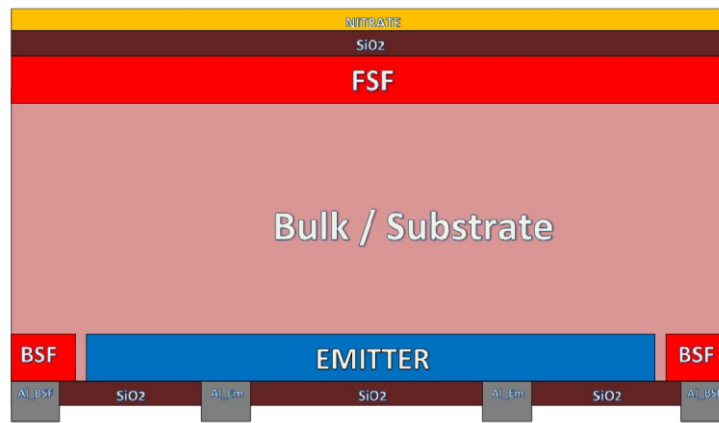
Contribuye a la movilidad de los portadores son de rejilla, donante, aceptor y la dispersión electrón-hueco (Ridley, 1988). La movilidad de portadores minoritarios aumenta a baja temperatura (Blatt, 1957) o a concentraciones de dopaje alto (Bennett, 1983).

## **3. RESULTADOS**

El presente trabajo es aumentar un contacto en el emisor y con esto se comprueba si la eficiencia mejora.

En las primeras simulaciones, aumenta un contacto  $50 \mu m$  y luego  $100 \mu m$  para ver cuál es la comparación de estas dos celdas fotovoltaica, la Figura 2 muestra elementos de simetría, en este caso y para los primeros resultados, se utiliza un contacto de  $50 \mu m$ .

**Fig. 2** Elemento de simetría- dos contactos de  $50 \mu m$  en el emisor.



Fuente: Autor

En las posteriores simulaciones, aumenta un contacto  $100 \mu\text{m}$  para ver cuál es la comparación de estas dos celdas fotovoltaica, la Figura 3 muestra elementos de simetría, en este caso y para los resultados que se van a comparar con las primeras simulaciones

Fig. 3 Elemento de simetría- dos contactos de  $100 \mu\text{m}$  en el emisor.



Fuente: Autor

Elemento simétrico: para SENTAURUS DEVICE encuentra una solución, la cual resuelve todas las ecuaciones en cada punto de malla. Dado que las celdas solares son dispositivos de área grande con espesor relativamente pequeño, para modelar toda la celda solar, requeriría una gran cantidad de puntos de malla para ser resuelta. Por lo tanto, la simulación de todo el dispositivo no es factible, incluso en dos dimensiones.

Sin embargo, debido a la simetría eléctrica que se encuentra en la mayoría de los dispositivos de celdas solares se identifica la solución que representa para todo el dispositivo. En el caso de este trabajo dicho elemento de simetría para una celda solar de BC-BJ con dos contactos en el emisor, es simetría bidimensional y se da en las figuras 2, 3.

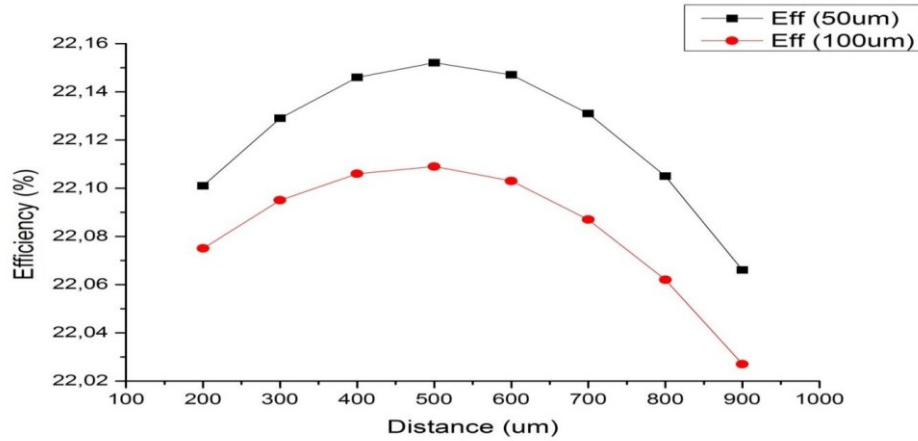
La tabla 1 muestra las distancias que se usaron en las simulaciones y el valor de los contactos que se utiliza en este trabajo, indicada en SENTAURUS DEVICE, en este caso el contacto es de  $50 \mu\text{m}$  y de  $100 \mu\text{m}$  se mueve a lo largo del emisor. Los resultados se muestran posteriormente en la Fig. 4.



**Tabla. 1** *parámetros de distancia y contactos.*

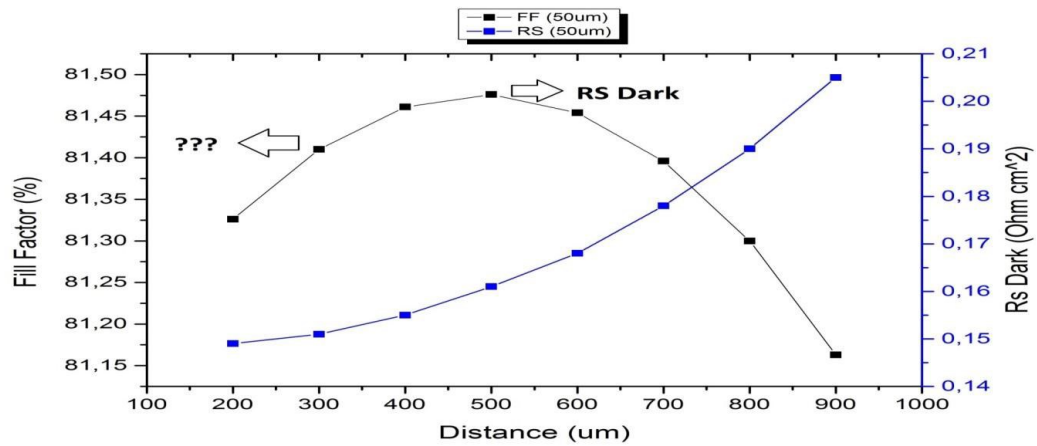
NOMBRE	DASTANCIA ( $\mu\text{m}$ )
X	<b>200-900</b>
Contacto en el emisor	<b>50 <math>\mu\text{m}</math></b>
Contacto en el emisor	<b>100 <math>\mu\text{m}</math></b>

Fig. 4 *Las eficiencias con dos contactos en el emisor*



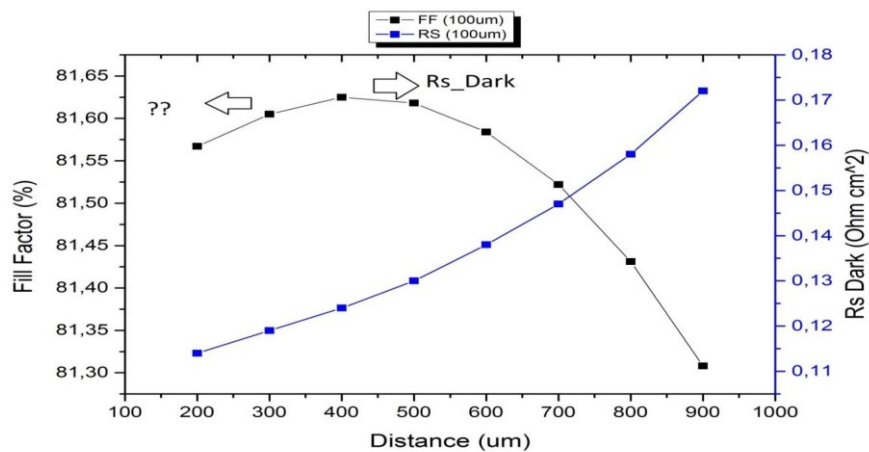
**RS Dark vs Fill Factor (50um)**

Fig.5 *RS Dark vs Fill Factor*



**RS Dark vs Fill Factor (100um)**

Fig.6 RS Dark vs Fill Factor



La resistencia en serie provoca una reducción del voltaje en el punto de máxima potencia y por lo tanto reduce el factor de llenado de la celda solar.

**REFERENCIAS**

- Alex Walker, J. F. (2010). *Understanding Synopsys Sentaurus by Simulating a P-N Junction*. Canada.
- Altermatt P.P., Dreissigacker S., Yang Y., Sprodowski C., Dezhdar T., Koc S., Veith B., Herrman S., Bock R., Bothe K. Schmidt J., Brendel R. (2009). Highly predictive modelling of entire Si solar cells for industrial applications. *Conference: European Photovoltaic Solar Energy Conference, At Hamburg, Germany, 24*, 901-906.
- Altermatt, P. P. (2011). Models for numerical device simulations of crystalline silicon solar cells—a review. *Journal of Computational Electronics*, 10(3), 314-330.
- Bennett, H. B. (1983). Hole and Electron Mobilities in Heavily Doped Silicon: Comparison of Theory and Experiment. *Solid-St. Electron*, 26(12), 1157–1166.
- Blatt, F. (1957). Scattering of carriers by ionized impurities in semiconductors. *J. Phys. Chem. Solids*, 1(4), 262–269.
- Finder. (09 de 2011). *El mundo sustentable de las energías renovables*. Recuperado el 20 de 05 de 2014, de [www.findernet.com](http://www.findernet.com)
- Häcker Rolf, Hangleiter Andreas. (1994). Intrinsic upper limits of the carrierlifetime in silicon. *Journal of Applied Physics*, 75(11), 7570-7572.
- Haouari-Merbah M., Belhamel M., Tobias I. and Ruiz J. (2005). Method of extraction and analysis of solar cell parameters from the dark current-voltage curve. *Proc. Spanish Conference on Electron Devices, Tarragona, Spain*, 275-277.

- Honsberg Christiana, B. S. (10 de 10 de 2013). *PV CDROM (Christiana Honsberg and Stuart Bowden)*. Recuperado el 15 de 01 de 2014, de [pveducation.org/](http://pveducation.org/)
- Jan Schmidt and Armin G Aberle. (1997). Accurate method for the determination of bulk minority-carrier lifetimes of mono-and multicrystalline silicon wafers. *Journal of Applied Physics*, 81(9), 6186-6199.
- Klaassen, D. B. (1992). A Unified Mobility Model for Device Simulation—I. Model Equations and Concentration Dependence. *Solid-State Electronics*, 35(7), 953–959.
- L. Huld, N. G. Nilsson, and K. G. Svantesson. (1979). The temperature dependence of band-to-band Auger recombination in silicon. *Applied Physics Letters*, 35(10), 776-777.
- M. Rüdiger, M. Rauer, C. Schmiga and M. Hermle. (2011). Effect of incomplete ionization for the description of highly aluminum-doped silicon. *J. Appl. Phys.*, 110, 024508.
- P.P. Altermatt, J.O. Schumacher, A. Cuevas, M.J. Kerr, S.W. Glunz, R.R. King, G. Heiser, A. Schenk. (2002). Numerical modeling of highly doped Si:P emitters based on Fermi–Dirac statistics and self-consistent material parameters. *J. Appl. Phys.*, 92(6), 3187-3199.
- R. Bock, P.P. Altermatt, J. Schmidt, R. Brendel. (2010). Formation of aluminum–oxygen complexes in highly aluminum-doped silicon. *Semicond. Sci. Technol.*, 25, 105007.
- Ridley, B. K. (1988). *Quantum processes in semiconductors*. Oxford, Clarendon Press.
- Schmidt J., Thiemann N., Bock R. and Brendel R. (2009). Recombination lifetimes in highly aluminum-doped silicon. *J. Appl. Phys.*, 106(9), 093707 - 093707-4.
- Sentaurus Device User Guide, Version D-2010.03, March 2010*. (2010). Synopsys Inc.
- SYNOPSYS. (2011). *Sentaurus Structure Editor User Guide. version F-2011.09*.
- W. Lochmann and A. Haug. (1980). Phonon-Assisted Auger Recombination in Si with Direct Calculation of the Overlap Integrals. *Solid State Communications*, 35(7), 535-556.