

# Evaluación del desempeño de los modelos de un diodo y dos diodos para módulos fotovoltaicos

## Performance evaluation of single-diode and two-diode models for photovoltaic modules

NÚÑEZ ORTIZ, Gustavo<sup>1</sup>  
ROBLES-ALGARÍN, Carlos<sup>2</sup>  
TOBÓN PÉREZ, Juan<sup>3</sup>  
OSPINO CASTRO, Adalberto<sup>4</sup>  
MARTÍNEZ LENGUA, Antonio<sup>5</sup>

### Resumen

Este artículo presenta la comparación de los modelos de un diodo y dos diodos de un módulo fotovoltaico, evaluando la exactitud, tiempo de cálculo y el desempeño en condiciones de prueba estándar y variables, definidas utilizando el clima del municipio de Zona Bananera. Las simulaciones se realizaron en Matlab/Simulink, y se validaron con la hoja de especificaciones del fabricante. Los resultados mostraron que el modelo de dos diodos tiene mayor eficiencia, pero con un mayor tiempo de cómputo.

**Palabras clave:** modelo de un diodo, modelo de dos diodos, módulo fotovoltaico

### Abstract

This paper presents the comparison between the single-diode and two-diode models for a photovoltaic module, evaluating the accuracy, computation time and performance under standard and variable test conditions, defined from the climate of the Zona Bananera municipal. Simulations were performed on Matlab/Simulink and validated with the datasheet of the manufacturer. The results showed that the two diode model has a higher efficiency, but with a longer computation time.

**key words:** single-diode model, two-diode model, photovoltaic module

---

## 1. Introducción

La energía solar es una de las fuentes de energía alternativa más prometedoras con la que se cuenta en la actualidad, debido a que contribuye a reducir considerablemente las emisiones que generan los combustibles fósiles (Ibrahim, Yahaya, Saad, & Umar, 2015) (Robles Algarin & Rodríguez Álvarez, 2018). A pesar del gran costo de instalación e inversión inicial, este tipo de energía no tiene costo de generación alguno y tiene un bajo costo de mantenimiento, por lo que la inversión inicial puede ser recuperada fácilmente (Ospino-Castro, Peña-Gallardo, Hernández-Rodríguez, Segundo-Ramírez, & Muñoz-Maldonado, 2017). Asimismo, dado que el precio

---

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico. Proyecto Cambio Climático. Universidad de la Costa. tavonunez260@gmail.com

<sup>2</sup> Docente de Planta. Facultad de Ingeniería. Universidad del Magdalena. croblesa@unimagdalena.edu.co

<sup>3</sup> Coordinador de Objetivo. Proyecto Investigación de los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático sobre el recurso hídrico, biodiversidad y actividades agropecuarias en el departamento del Magdalena. Gobernación del Magdalena - Universidad de la Costa. jtobon1@cuc.edu.co

<sup>4</sup> Docente de Planta. Departamento de Energía. Universidad de la Costa. aospino8@cuc.edu.co

<sup>5</sup> Ingeniero de Proyectos. Energesis Natura S.A.S. anjoma93@gmail.com

de la implementación de la energía solar ha disminuido considerablemente debido a la alta demanda, cada vez más países incursionan en la implementación de sistemas solares fotovoltaicos (Ćalasan, Jovanović, Rubežić, Mujović, & Đukanović, 2019) (Robles-Algarín, Taborda-Giraldo, & Ospino-Castro, 2018).

Considerando que el rendimiento de una celda solar depende de varios factores intrínsecos como la calidad del material, temperatura de funcionamiento, reflexión de la energía irradiante y suciedad, así como de factores externos como variaciones climáticas, inclinación y sombras, es necesario implementar métodos que aseguren la máxima transferencia de potencia para optimizar el uso de las celdas y reducir el costo en las instalaciones solares (Robles Algarín, Taborda Giraldo, & Rodríguez Álvarez, 2017) (Li, Zhong, Ma, Kazemian, & Gu, 2020). Para la implementación de estos métodos es necesario el estudio del comportamiento de una celda solar, el cual puede ser llevado a cabo con modelos que tienen en cuenta las interacciones físicas que ocurren en una celda solar cuando genera energía eléctrica (Pavan Kumar, Parimi, & Uma Rao, 2014) (Masmoudi, Ben Salem, & Derbel, 2016) (Pagola, Peña, Segundo, & Ospino, 2019).

En la literatura se encuentran modelos químicos, físicos, térmicos, ópticos y eléctricos que permiten estudiar el desempeño de una celda solar. Entre los modelos eléctricos más utilizados para una celda solar se encuentra el modelo de un diodo, el cual se basa en tres parámetros: voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ , corriente de circuito abierto  $I_{sc}$  y factor de idealidad  $n$ , que hace referencia al fenómeno de difusión del diodo. Para aumentar la exactitud de las curvas de corriente – voltaje y potencia – voltaje, varios investigadores han desarrollado otros modelos, como el de dos diodos, el cual, además de los parámetros que el modelo de un diodo implementa, tiene  $n_1$  y  $n_2$ , teniendo en cuenta así otro fenómeno asociado al comportamiento eléctrico del diodo (recombinación) (Franzitta, Orioli, & Gangi, 2017). Conjuntamente, el uso del programa Simulink, ambiente de programación gráfica para modelado, ha sido reportado en la literatura para modelar eléctricamente una celda solar (Vera-Dávila, Delgado-Ariza, & Sepúlveda-Mora, 2018).

Teniendo en cuenta el contexto anterior, en este artículo se realizó un estudio de la eficiencia de dos modelos eléctricos teniendo en cuenta las condiciones climáticas del Municipio de Zona Bananera, Magdalena, Colombia, particularmente los valores de irradiación solar y temperatura que fueron obtenidos a partir de una estación meteorológica HOBO RX3003. Es de resaltar que, de todos los factores que pueden afectar el rendimiento de una celda solar, la temperatura es la que más impacto tiene, dado que afecta el rendimiento eléctrico y la potencia de salida (Algarín, Fuentes, & Castro, 2018). Las condiciones climáticas en Colombia son altamente favorables para el desarrollo de energías renovables, dada su ubicación estratégica (Vergara, Rey, Osma, & Ordóñez, 2013), sin embargo, en el país existen más de dos millones de personas en áreas rurales que no tienen acceso a energía eléctrica (Aabrek, Forseth, Bueno-Lopez, & Molinas, 2018).

En la primera parte del artículo se presentan los modelos eléctricos utilizados para el modelado de la celda solar, así como el análisis estadístico de los datos meteorológicos de la zona de estudio. La segunda parte presenta los resultados de las simulaciones y el efecto de la temperatura e irradiación en el rendimiento de la celda solar, los cuales fueron contrastados con los datos que entrega el fabricante para el módulo solar SL250TU.

---

## 2. Metodología

### 2.1. Generalidades de un módulo solar

Un módulo solar de silicio tiene un factor de eficiencia de temperatura negativo, indicando que por cada grado que se incrementa la temperatura de operación, la eficiencia del módulo solar disminuye. Los efectos físicos que relacionan la eficiencia con la temperatura son algo complejos, pero los factores que más predominan en este fenómeno son los siguientes: las vibraciones reticulares interfieren con el paso libre de los portadores de carga y la unión comienza a perder su poder al separar las cargas. El primer efecto ocurre incluso a temperaturas

ambiente, el segundo toma su lugar a 300 °C, cuando la eficiencia es casi nula. Además de la temperatura, la cantidad de luz absorbida también es una propiedad que determina la eficiencia de una celda solar. En la actualidad, la eficiencia de un panel solar monocristalino oscila entre 17 y 20 % (Sultan, Tso, & Efsan, 2020).

Además, los módulos solares absorben en promedio 80% de la radiación solar recibida. Una parte de esta radiación se convierte en electricidad y la restante se convierte en calor. Este restante aumenta la concentración de portadores intrínsecos, aumentando así la corriente de saturación inversa y por consiguiente las pérdidas (Cepeda & Sierra, 2016). Para determinar las especificaciones eléctricas de un módulo solar, los fabricantes trabajan en laboratorio bajo condiciones de prueba estándar (STC: 1000 W/m<sup>2</sup> y 25°C), con lo cual se calculan los parámetros eléctricos del módulo (Oliveti, y otros, 2014):

- Potencia máxima ( $P_{max}$ , W): potencia obtenida en el punto de máxima potencia. Se calcula con el producto de voltaje en el punto máximo ( $V_{mp}$ ) y la corriente en el punto máximo ( $I_{mp}$ ).
- Voltaje en el punto máximo ( $V_{mp}$ , V).
- Corriente en el punto máximo ( $I_{mp}$ , A).
- Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ , V).
- Corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ , A).
- Coeficiente de temperatura de  $V_{oc}$  ( $V_{ocT}$ , %/°C): define la variación de  $V_{oc}$  como función de la temperatura. El voltaje de circuito abierto a una temperatura T se obtiene a través de  $V_{ocT}=V_{oc}(1+\beta V_{oc}(T-25))$ , donde  $\beta V_{oc}$  es el coeficiente de temperatura en %/°C y T es la temperatura ambiente.
- Coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$  ( $I_{scT}$ , %/°C): define la variación de  $I_{sc}$  como función de la temperatura. La corriente de corto circuito a una temperatura T se obtiene a través de  $I_{scT}=I_{sc}(1+\alpha I_{sc}(T-25))$ , donde  $\alpha I_{sc}$  es el coeficiente de temperatura en %/°C y T es la temperatura ambiente.
- Temperatura de trabajo de la celda ( $T_c$ , °C): temperatura que alcanzan las celdas dependiendo de la radiación absorbida y temperatura ambiente. Se obtiene a través de  $T_c=T_a+G(T_{ONC}-20)/800$ , donde  $T_a$  es la temperatura ambiente,  $T_{ONC}$  es la temperatura de operación nominal de la celda y G es la irradiación.

Las curvas de potencia vs voltaje y de corriente vs voltaje bajo las STC para un módulo solar SL250TU se muestran en las Figuras 1 y 2.

## 2.2. Condiciones meteorológicas del municipio de Zona Bananera

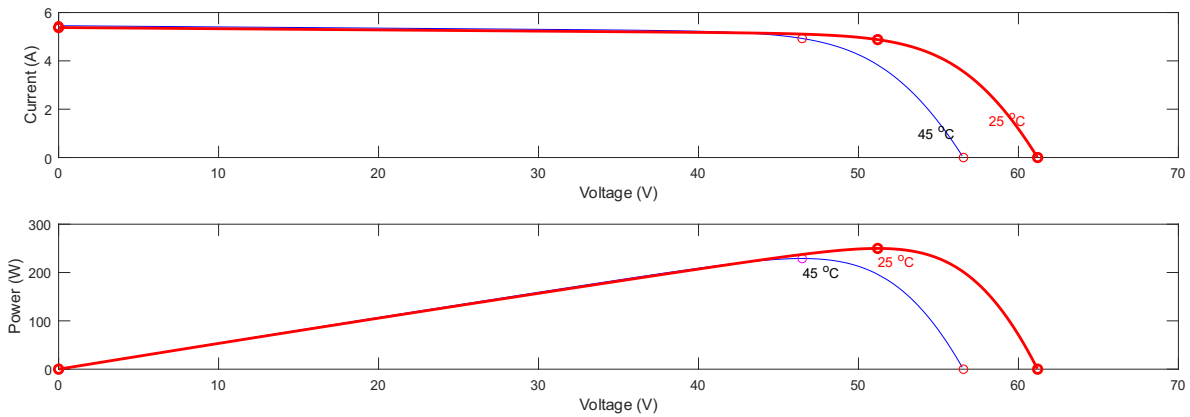
Según la (Unidad de Planeación Minero Energética, 2005) y el (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2014c), las condiciones climatológicas del municipio de Zona Bananera son las siguientes:

- Temperaturas mínimas de 22 a 24 °C, temperaturas medias por encima de 28 °C y temperaturas máximas por encima de 34 °C durante el período de 1981 a 2010.
- Irradiación por hora entre 5.5 y 6.0 kWh/m<sup>2</sup> durante el período de 1981 a 2010.

Estos datos son importantes puesto que sirven como valores de referencia para el análisis de los datos obtenidos con las estaciones meteorológicas.

**Figura 1**

Curvas PV e IV del módulo solar SL250TU con irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup> y con temperaturas de 45°C y 25°C

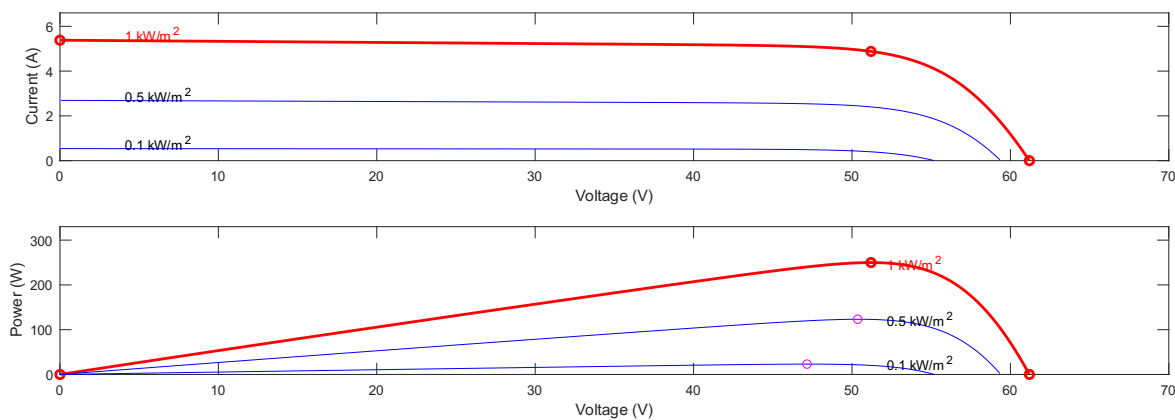


Fuente: Matlab/Simulink

----

**Figura 2**

Curvas PV e IV del módulo solar SL250TU con temperatura de 25°C e irradiancias de 1000 W/m<sup>2</sup>, 500 W/m<sup>2</sup> y 100 W/m<sup>2</sup>



Fuente: Matlab/Simulink

### 2.3. Análisis de los datos meteorológicos

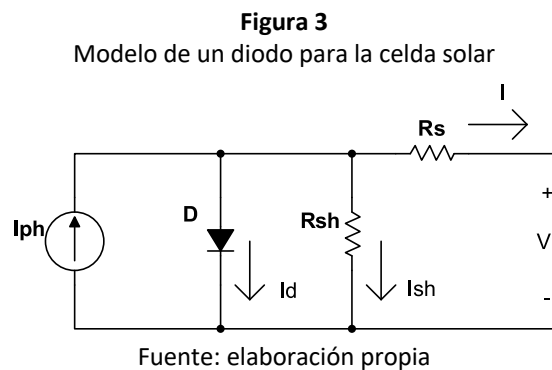
Con el fin de analizar el rendimiento de los modelos implementados para el módulo solar frente a cambios de temperatura, se utilizaron valores dinámicos para la temperatura de operación con una irradiación solar constante. De esta forma, se procedió a realizar un análisis descriptivo de los datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en la Zona Bananera, Municipio del Departamento de Magdalena, Colombia (Corregimiento de Tucurínca, coordenadas Magna Sirgas X-Y: 990597.05-1668844.75). Se utilizaron los datos del mes de Julio de 2019 en intervalos de cinco minutos.

Se implementó un script en Python para adquirir todos los datos de temperatura e irradiación de cada hora, a partir de un archivo .xlsx, con el fin de calcular los valores promedios y almacenarlos en el mismo archivo. Una vez se calcularon los valores promedios de temperatura e irradiación por hora, se tomaron los valores máximos y mínimos registrados, para poder establecer el rango de valores de temperatura necesarios para la validación de los modelos.

El valor mínimo de temperatura establecido fue la temperatura mínima promedio por hora que coincidía con la medición mínima de irradiación, para poder descartar temperaturas registradas en horas nocturnas. El valor máximo fue la temperatura máxima promedio por hora en todo el mes. A su vez, el valor mínimo de irradiación establecido fue la irradiación promedio por hora. Con este procedimiento se estableció un rango de temperaturas entre 25°C y 37°C con un delta de 1°C, el cual fue el rango utilizado para la validación de los modelos matemáticos estudiados en este trabajo.

### 2.4. Modelo de un diodo

El circuito equivalente del modelo de un diodo para una celda solar consiste en una fuente de corriente en paralelo a un diodo ideal formado por una unión PN, junto con otros componentes que emulan pérdidas: una resistencia en serie que representa la resistencia del diodo y las pérdidas térmicas, y una resistencia shunt que representa las corrientes de fuga debido a los defectos de manufactura en la estructura (Oliveti, y otros, 2014). El modelo se muestra en la Figura 3.



Bajo condiciones de iluminación, la corriente total  $I$  se representa en función de la corriente fotogenerada por la celda,  $I_{ph}$  es la corriente que circula por el diodo e  $I_d$  es la corriente que circula por la resistencia de shunt  $I_{sh}$ , como se puede ver en la ecuación 1, representada en Simulink por la Figura 4.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

La fotocorriente  $I_{ph}$  se representa con la ecuación 2, la cual se implementó en Simulink como se muestra en la Figura 5.

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - 298.15)] \times \frac{G}{1000} \quad (2)$$

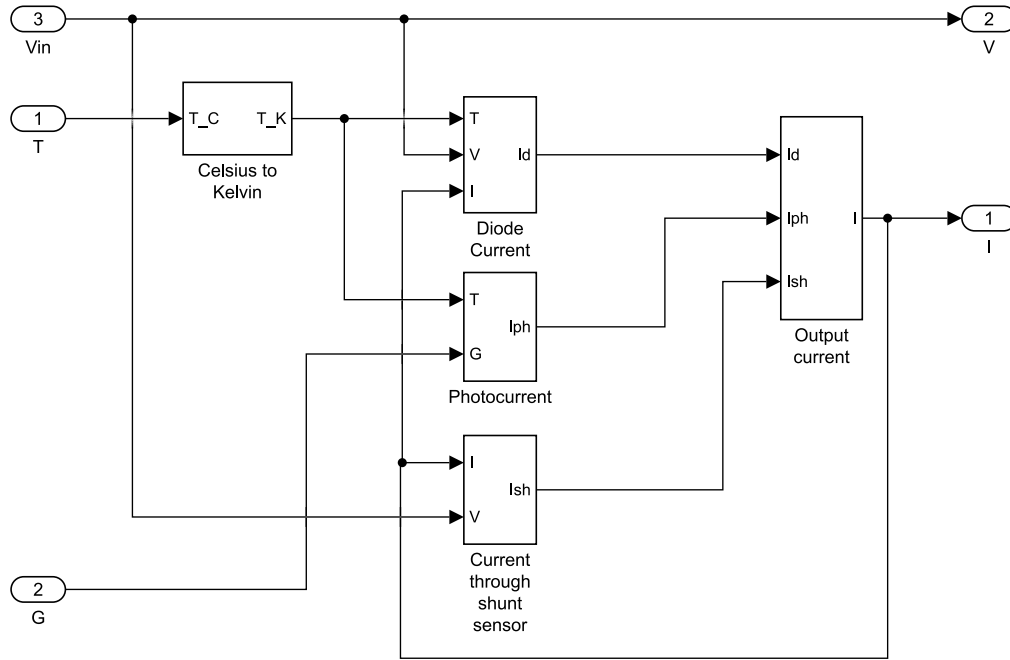
Donde  $k_i$  es la corriente de cortocircuito de la celda a 25°C y 1000 W/m<sup>2</sup> con un valor de 0.0032 A,  $T$  es la temperatura de operación de la celda en °K y  $G$  es la irradiación solar en W/m<sup>2</sup>.

La corriente  $I_d$  que circula por el diodo se representa con la ecuación 3, y en Simulink con la Figura 6.

$$I_d = I_0 \times \left( e^{\frac{q(V+I R_s)}{n K N_s T}} - 1 \right) \quad (3)$$

Donde  $I_0$  es la corriente de saturación inversa del diodo en Amperios, la cual depende de la temperatura,  $q$  es la carga del electrón con un valor de  $1.6 \times 10^{-19}$  C,  $n$  es el factor de idealidad del diodo con valor de 1V,  $K$  es la constante de Boltzmann que es igual a  $1.3805 \times 10^{-23}$  J/K y  $N_s$  es el número de celdas conectadas en series, establecido por el fabricante.

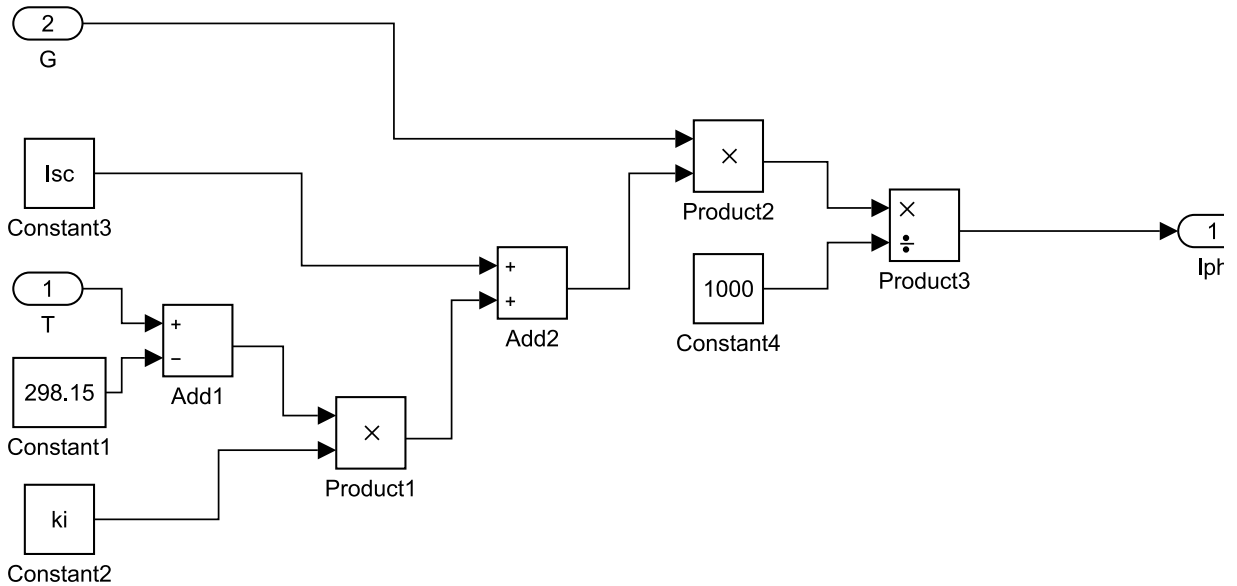
**Figura 4**  
Diagrama de bloques en Simulink para la corriente  $I$  para el modelo de un diodo



Fuente: elaboración propia

----

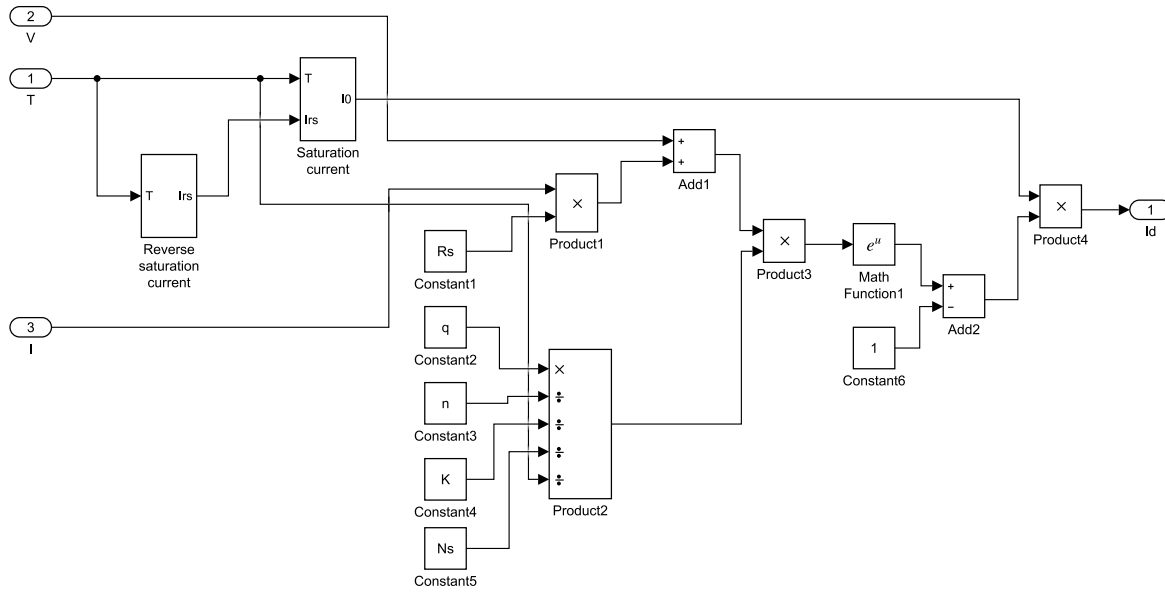
**Figura 5**  
Diagrama de bloques en Simulink para la fotocorriente



Fuente: elaboración propia

**Figura 6**

Diagrama de bloques en Simulink para la corriente  $I_d$



Fuente: elaboración propia

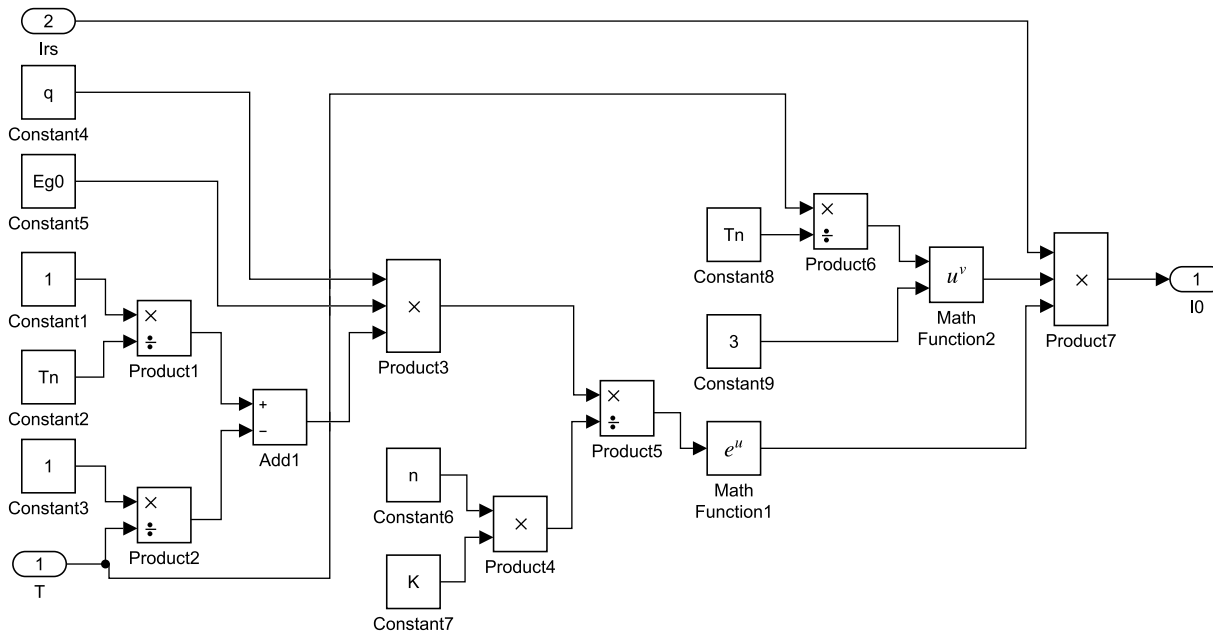
La corriente de saturación  $I_0$  se representa con la ecuación 4, que fue implementan en Simulink como se muestra en la Figura 7.

$$I_0 = I_{rs} \times \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \times e^{\frac{qE_{g0} * (\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T})}{nK}} \quad (4)$$

Donde  $I_{rs}$  es la corriente de saturación inversa en condiciones de operación estándar (STC),  $T_n$  es la temperatura de operación en STC y  $E_{g0}$  es la energía del semiconductor en la banda prohibida con valor de 1.1 eV.

**Figura 7**

Diagrama de bloques en Simulink para la corriente de saturación

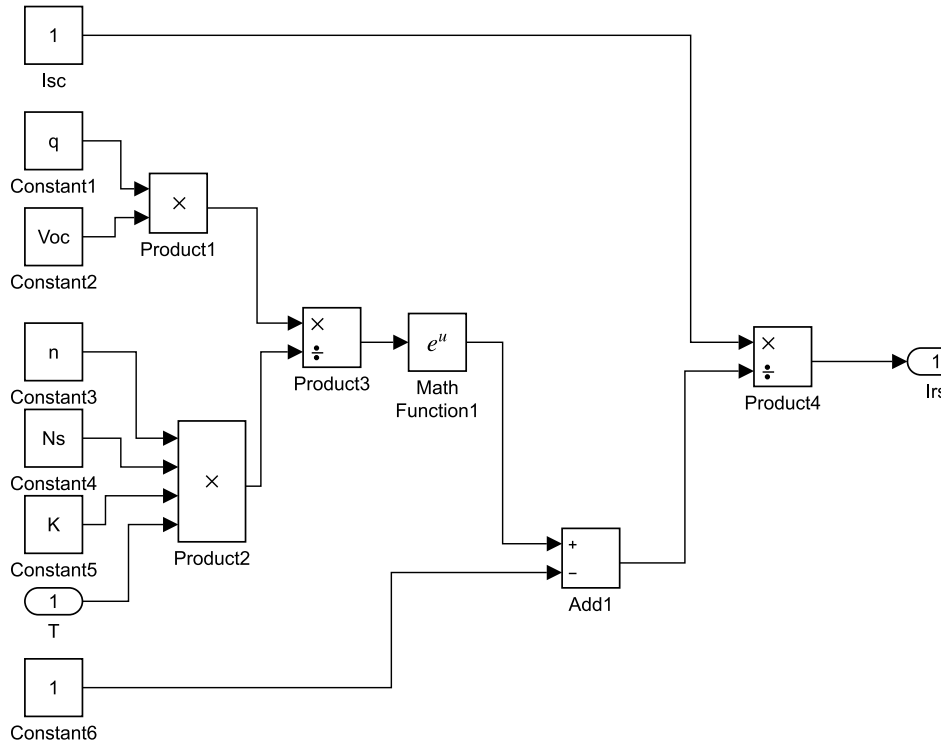


Fuente: elaboración propia

La corriente de saturación inversa del diodo bajo las STC se representa con la ecuación 5, la cual se implementó en Simulink como se observa en la Figura 8.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q \times V_{oc}}{n N_s K T}} - 1} \quad (5)$$

**Figura 8**  
Diagrama de bloques en Simulink para la corriente de saturación inversa del diodo

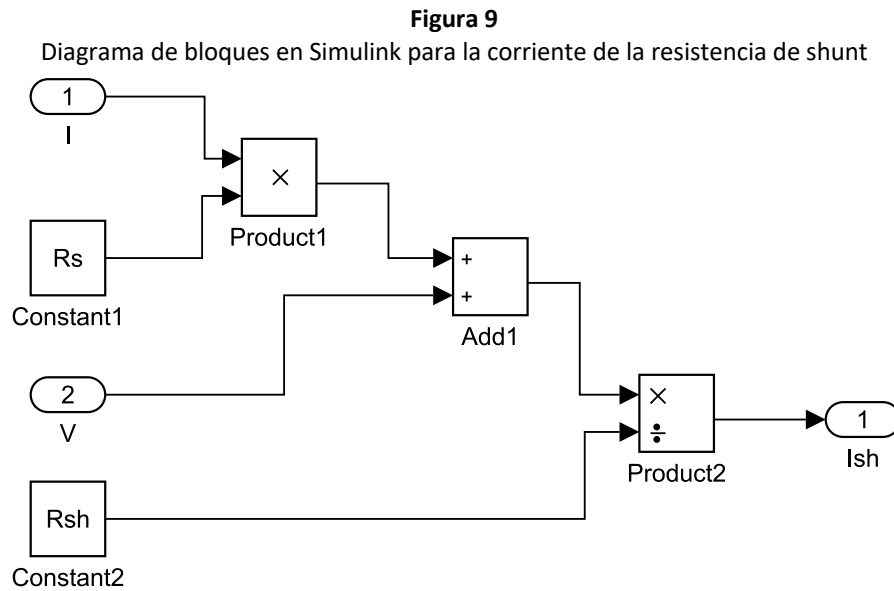


Fuente: elaboración propia

La corriente que circula por la resistencia de shunt se representa como en la ecuación 6, que fue modelada en Simulink como se muestra en la Figura 9.

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$



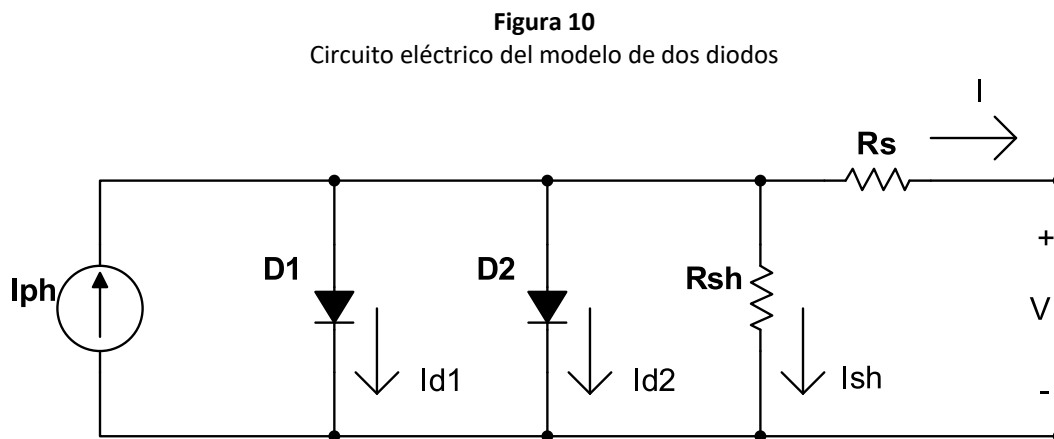


Fuente: elaboración propia

El modelo de un diodo supone que la pérdida por recombinación en la zona de deplexión es nula, cuando en una celda solar real la pérdida por recombinación es notable, especialmente en voltajes bajos. Además, este modelo sólo considera el fenómeno de la difusión ajustando el factor de idealidad en  $n=1$  (Masmoudi, Ben Salem, & Derbel, 2016) (Alrahim Shannan, Yahaya, & Singh, 2013).

### 2.5. Modelo de dos diodos

El circuito equivalente del modelo de una celda solar representada por el modelo de dos diodos consiste en una fuente de corriente en paralelo con dos diodos, ambos formados por una unión PN, junto con una resistencia en serie y una resistencia de shunt, que emulan las mismas pérdidas del modelo de un diodo. Este modelo se caracteriza por ser matemáticamente más complejo que el modelo de un diodo, puesto que tiene en cuenta el fenómeno de la recombinación, aumentando así la exactitud en la curva IV y PV (Masmoudi, Ben Salem, & Derbel, 2016) (Alrahim Shannan, Yahaya, & Singh, 2013). El modelo implementado en este trabajo se muestra en la Figura 10.



Fuente: elaboración propia

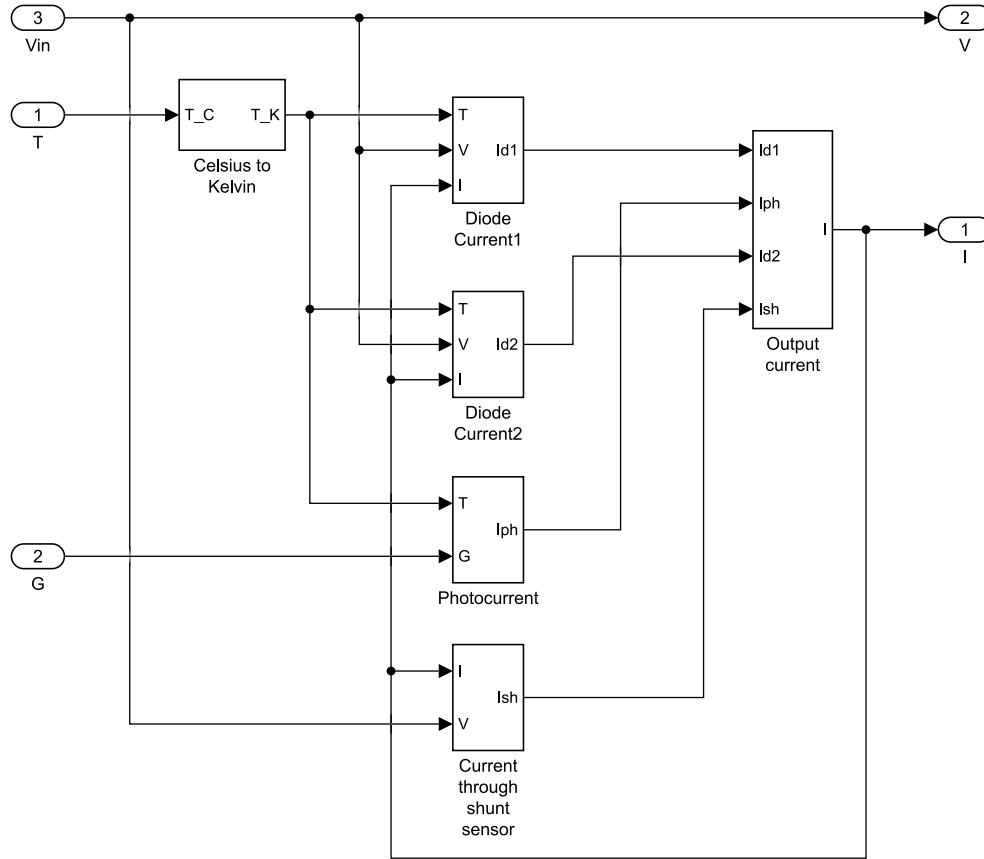
Bajo condiciones de iluminación, la corriente total  $I$  se representa en función de la corriente fotogenerada por la celda ( $I_{ph}$ ). Las corrientes que circulan por los diodos  $I_{d1}$  e  $I_{d2}$ , y la corriente que circula por la resistencia de shunt

$I_{sh}$ , se describen por la ecuación 7 a través de la corriente  $I$ . Esta ecuación fue implementada en Simulink según se muestra en la Figura 11.

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (7)$$

**Figura 11**

Diagrama de bloques en Simulink para la corriente  $I$  para el modelo dos diodos



Fuente: elaboración propia

Las representaciones de la fuente de corriente  $I_{ph}$  y la corriente que circula por la resistencia shunt  $I_{sh}$  son iguales a las que se plantean en el modelo de un diodo en las ecuaciones 2 y 6. Las corrientes que circulan por los diodos  $I_{d1}$  e  $I_{d2}$  se representan con las ecuaciones 8 y 9.

$$I_{d1} = I_{01} \times \left( e^{\frac{q(V+I R_s)}{n_1 K N_s T}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$I_{d2} = I_{02} \times \left( e^{\frac{q(V+I R_s)}{n_2 K N_s T}} - 1 \right) \quad (9)$$

Donde  $I_{01}$  e  $I_{02}$  son las corrientes de saturación inversa de los dos diodos,  $n_1$  y  $n_2$  son los factores de idealidad de los diodos, el primero tiene en cuenta el fenómeno de la difusión y el segundo de la recombinación. Las corrientes de saturación inversa de los dos diodos se representan con las ecuaciones 10 y 11.

$$I_{01} = I_{rs1} \times \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 \times e^{\frac{q E_{g0} \times \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n_1 K}} \quad (10)$$

$$I_{02} = I_{rs2} \times \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \times e^{\frac{qE_{g0} \times \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n_2 K}} \quad (11)$$

Donde  $I_{rs1}$  e  $I_{rs2}$  son las corrientes de saturación de los diodos bajo las STC, las cuales se representan con las ecuaciones 12 y 13.

$$I_{rs1} = \frac{I_{sc}}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e^{n_1 N_s K T} - 1}} \quad (12)$$

$$I_{rs2} = \frac{I_{sc}}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e^{n_2 N_s K T} - 1}} \quad (13)$$

Los diagramas de bloques de las ecuaciones 8-13 coinciden con los diagramas presentados en las ecuaciones 3-5, con la consideración de que es necesario ajustar el factor de idealidad.

Este modelo se caracteriza por ser más preciso para valores de irradiación bajos y permitir las simulaciones para condiciones dinámicas de temperatura. De acuerdo con algunas investigaciones relacionadas con la teoría de semiconductores y de la física de las uniones PN en los diodos (Masmoudi, Ben Salem, & Derbel, 2016) (Franzitta, Orioli, & Gangi, 2017), este modelo se ha ajustado para considerar el fenómeno de la difusión con un factor de calidad  $n=1$  y para el fenómeno de la recombinación con  $n=2$ .

### 2.6. Especificaciones del módulo solar

En la Tabla 1 se muestran las especificaciones del módulo solar SLP250S-96, el cual fue utilizado para validar el desempeño de los modelos de uno y dos diodos abordados en la presente investigación.

**Tabla 1**  
Especificaciones del módulo solar SLP250S-96

Parámetro	Valor
Potencia en STC	250 W
Densidad de potencia en STC	147.929 W/m <sup>2</sup>
V <sub>mp</sub> : voltaje a potencia máxima	51.2 V
I <sub>mp</sub> : corriente a potencia máxima	4.88 A
V <sub>oc</sub> : voltaje de circuito abierto	61.2 V
I <sub>sc</sub> : corriente de corto circuito	5.38 A
Temperatura nominal de operación de la celda	46.6 °C
Coefficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto	-0.379 %/°C
Coefficiente de temperatura de corriente de corto circuito	0.069 %/°C
Coefficiente de temperatura de temperatura máxima	-0.467 %/°C

Fuente: (Solarland\_USA)

### 3. Resultados

Utilizando los modelos desarrollados, se calcularon los parámetros eléctricos  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$  en condición estándar de operación, los cuales fueron comparados con las especificaciones del módulo fotovoltaico de referencia. Los resultados de la validación se muestran en la Tabla 2, en los que se agregó el tiempo de cómputo promedio de cada modelo. Se observa que los parámetros generados por el modelo de dos diodos tienen un grado de error menor que los parámetros generados por el modelo de un diodo y que el tiempo de cómputo del modelo de un diodo es menor que el tiempo de cómputo del modelo de dos diodos.

**Tabla 2**

Parámetros eléctricos del módulo SLP250S-96 generados por el modelo de un diodo y por el modelo de dos diodos en STC

Parámetros eléctricos	Hoja de especificaciones del fabricante	Modelo de un diodo	Error relativo del modelo de un diodo	Modelo de dos diodos	Error relativo del modelo de dos diodos
$V_{oc}$ (V)	61.2	65.2	6.535948 %	64.11 V	4.754902 %
$I_{sc}$ (A)	5.38	5.369	0.20446 %	5.369 A	0.20446 %
$P_{max}$ (W)	250	269.4	7.76 %	250.6 W	0.24 %
$I_{mp}$ (A)	4.88	4.811	1.41393 %	4.82 A	1.22951 %
$V_{mp}$ (V)	51.2	56	9.375 %	52 V	1.5625 %
Tiempo promedio de cálculo (s)	N/A	0.1532	N/A	0.3469	N/A

Fuente: propia

Además, también se compararon los parámetros eléctricos  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  generados por cada modelo para valores dinámicos de temperatura con una irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Los resultados se muestran en la Tabla 3. La diferencia porcentual promedio es de 7.3616% con una desviación estándar de 0.2886. También se puede apreciar que mientras  $V_{oc}$  aumenta proporcionalmente con la temperatura,  $I_{sc}$  disminuye proporcionalmente.

Las Figuras 12 y 13 representan las curvas PV e IV bajo condiciones variables de temperatura a una irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  para el modelo de un diodo. Se utilizaron valores de temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  y  $35^\circ\text{C}$ . Se puede observar que cuando la temperatura aumenta, la corriente de salida aumenta al tiempo que el voltaje disminuye considerablemente, reduciendo la potencia de salida. Estos resultados corroboran el desempeño teórico establecido por el fabricante del módulo solar.

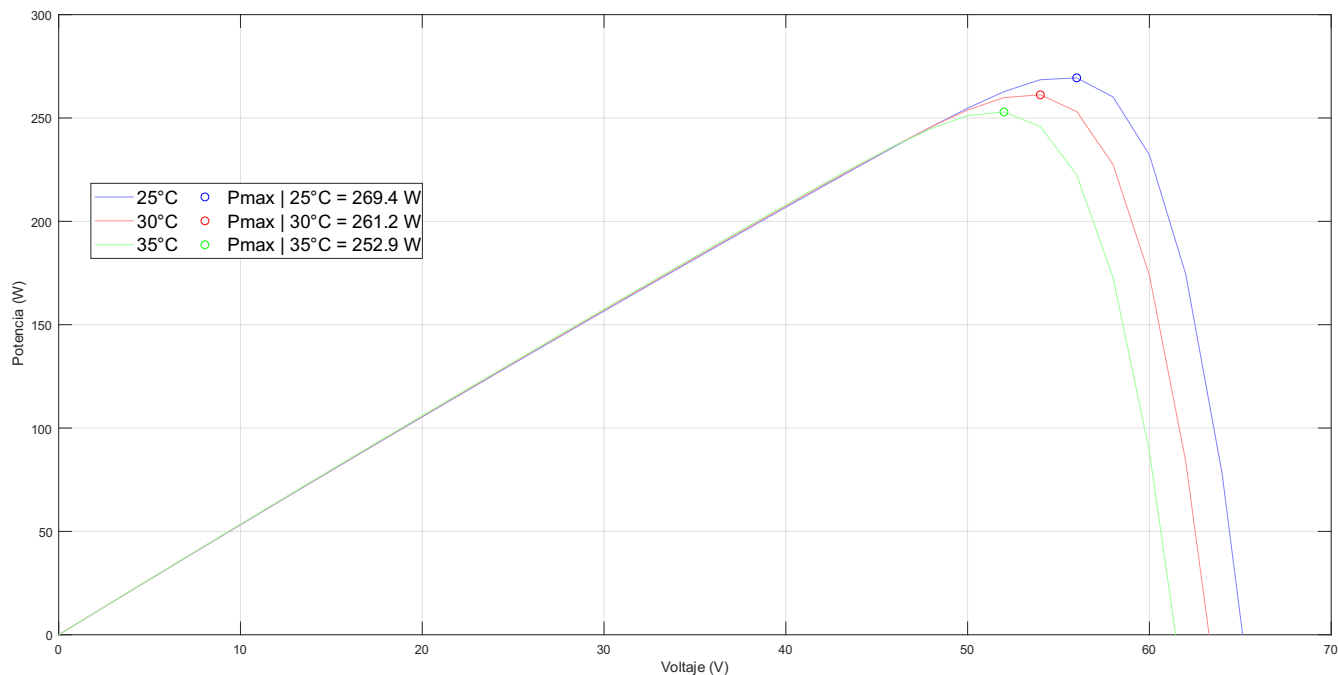
**Tabla 3**

Parámetros eléctricos del módulo SLP250S-96 generados por el modelo de un diodo y por el modelo de dos diodos con temperatura variable e irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$

No.	Temp ( $^\circ\text{C}$ )	Simulación del modelo de un diodo			Simulación del modelo de dos diodos			$\Delta P_{max}$ (%)
		$P_{max}$ (W)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	$P_{max}$ (W)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	
1	25	269.4	65.2	5.369	250.6	64.11	5.369	6.978
2	26	267.5	64.83	5.372	249.2	63.74	5.372	6.841
3	27	266.3	64.46	5.375	247.6	64.36	5.375	7.022
4	28	264.9	64.09	5.378	245.8	62.98	5.378	7.210
5	29	263.2	63.72	5.381	243.9	62.6	5.381	7.333
6	30	261.2	63.35	5.385	241.8	62.22	5.385	7.427
7	31	259	62.98	5.388	240.4	61.84	5.388	7.181
8	32	257.7	62.61	5.391	238.9	61.47	5.391	7.295
9	33	256.4	62.24	5.394	237.1	61.09	5.394	7.527
10	34	254.8	61.87	5.397	235.2	60.71	5.397	7.692
11	35	252.9	61.5	5.4	233.1	60.33	5.4	7.829
12	36	250.8	61.13	5.404	231.5	59.95	5.404	7.695
13	37	249.1	60.76	5.407	230	59.57	5.407	7.667

Fuente: propia

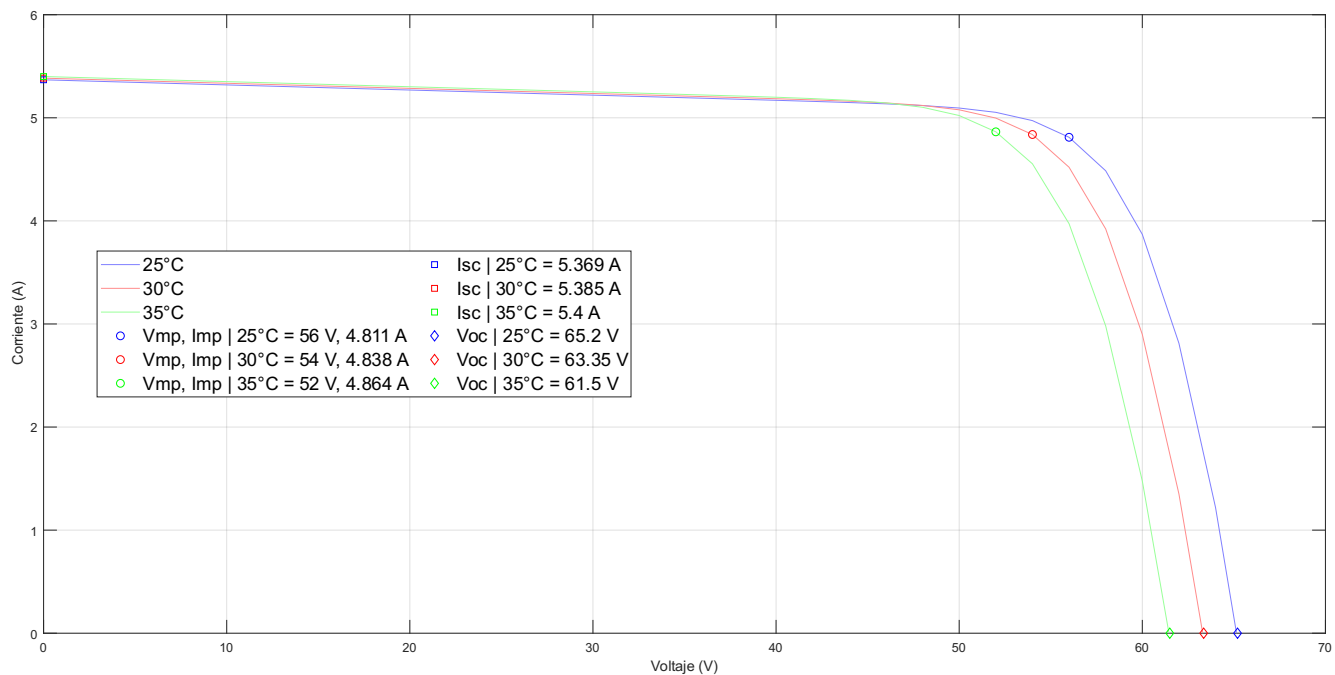
**Figura 12**  
 Curvas PV bajo temperatura variable e irradiación constante de 1000 W/m<sup>2</sup> para el modelo de un diodo



Fuente: elaboración propia

-----

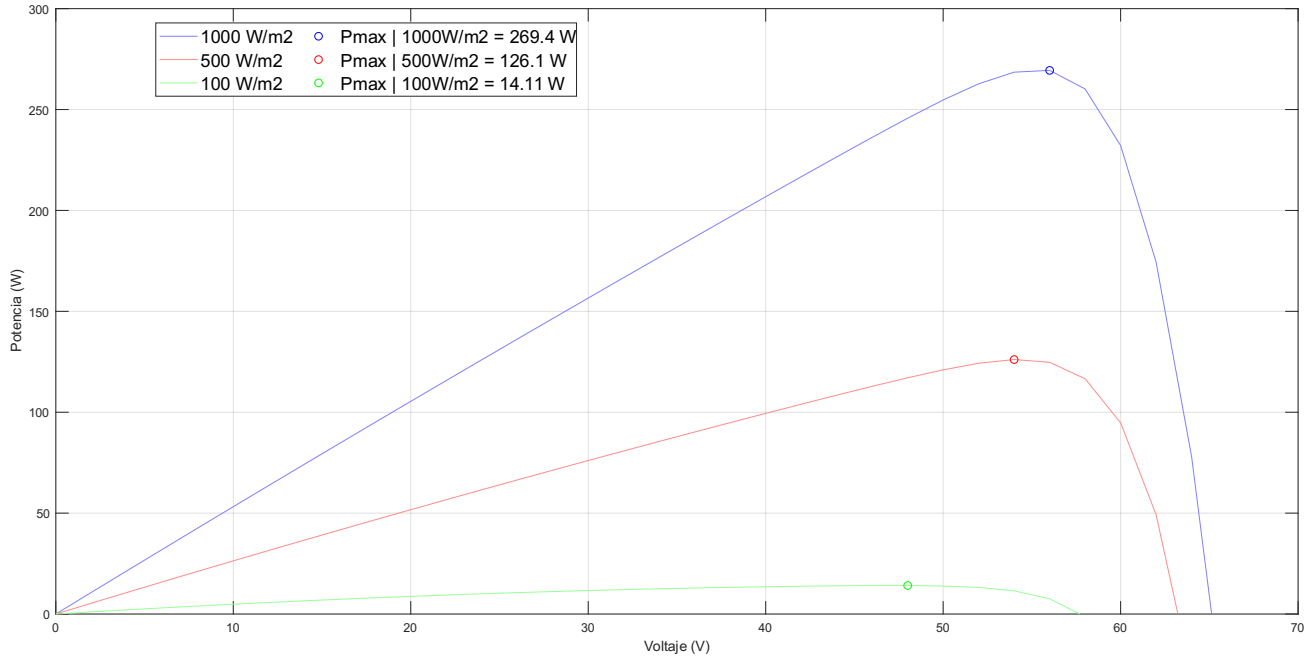
**Figura 13**  
 Curvas IV bajo temperatura variable e irradiación constante de 1000 W/m<sup>2</sup> para el modelo de un diodo



Fuente: elaboración propia

Las Figuras 14 y 15 representan las curvas PV e IV bajo condiciones variables de irradiancia a una temperatura constante de 25°C para el modelo de un diodo. En este caso se utilizaron los siguientes valores para la irradiancia: 100, 500 y 1000 W/m<sup>2</sup>. Con estas curvas se puede apreciar que cuando la irradiancia aumenta, el voltaje y la corriente de salida también se incrementan y por lo tanto se aumenta la potencia de salida.

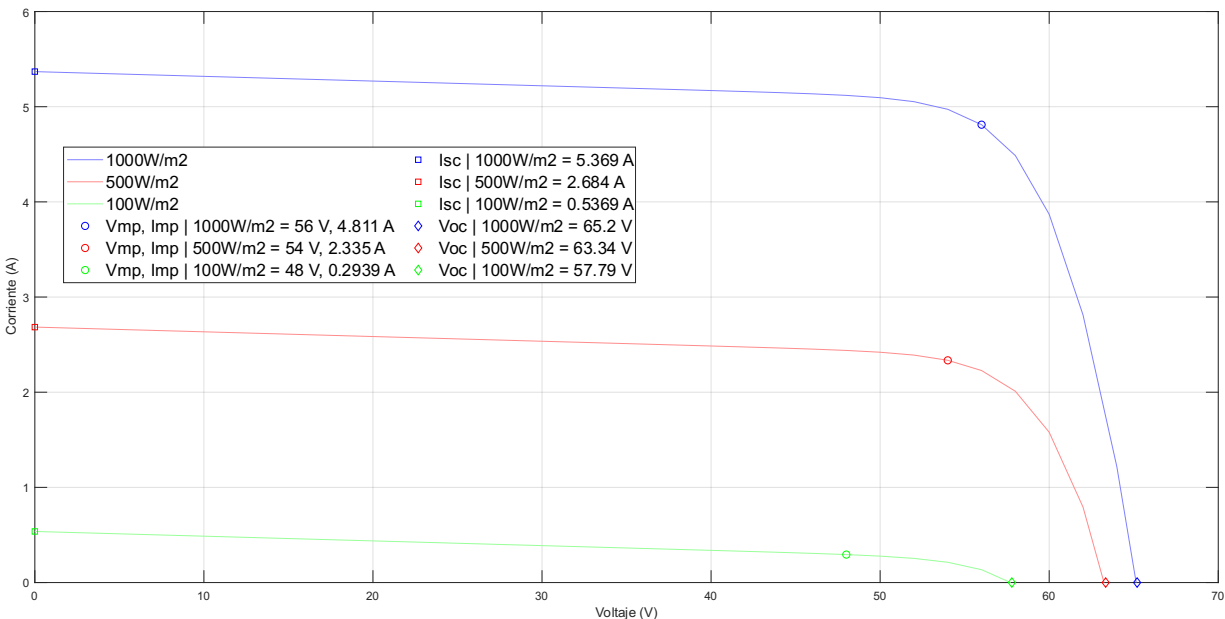
**Figura 14**  
Curvas PV bajo irradiancia variable y temperatura constante de 25 °C para el modelo de un diodo



Fuente: elaboración propia

-----

**Figura 15**  
Curvas IV bajo irradiancia variable y temperatura constante de 25 °C para el modelo de un diodo

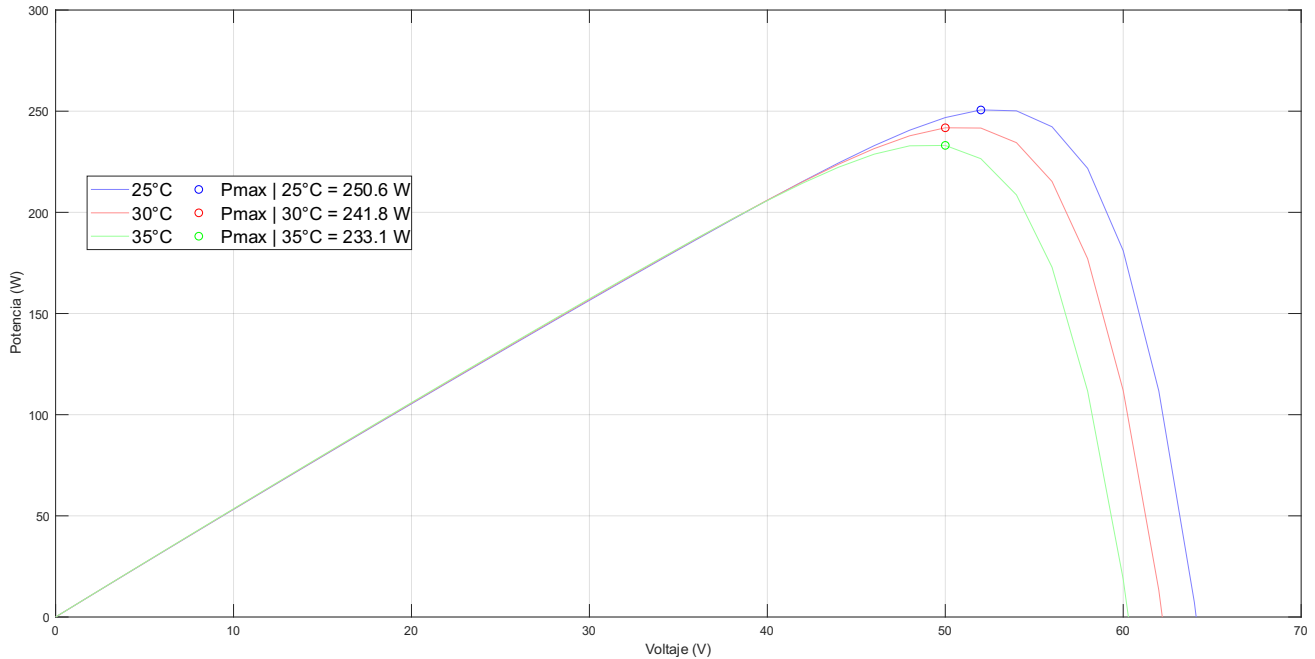


Fuente: elaboración propia

Las Figuras 16 y 17 representan las curvas PV e IV bajo condiciones variables de temperatura a una irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  para el modelo de dos diodos. Se puede observar que la temperatura tiene el mismo impacto que tiene en el modelo de un diodo. Se resalta la exactitud de este modelo, especialmente en las STC.

**Figura 16**

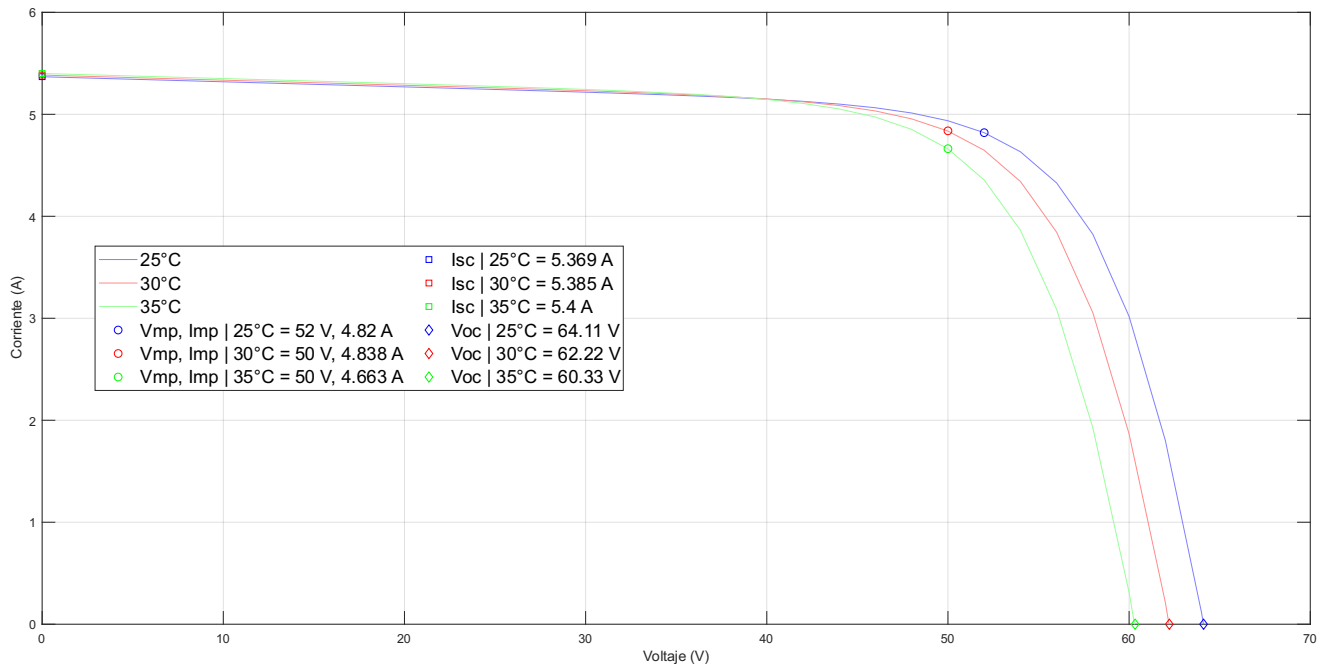
Curvas PV bajo temperatura variable e irradiación constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  para el modelo de dos diodos



Fuente: elaboración propia

**Figura 17**

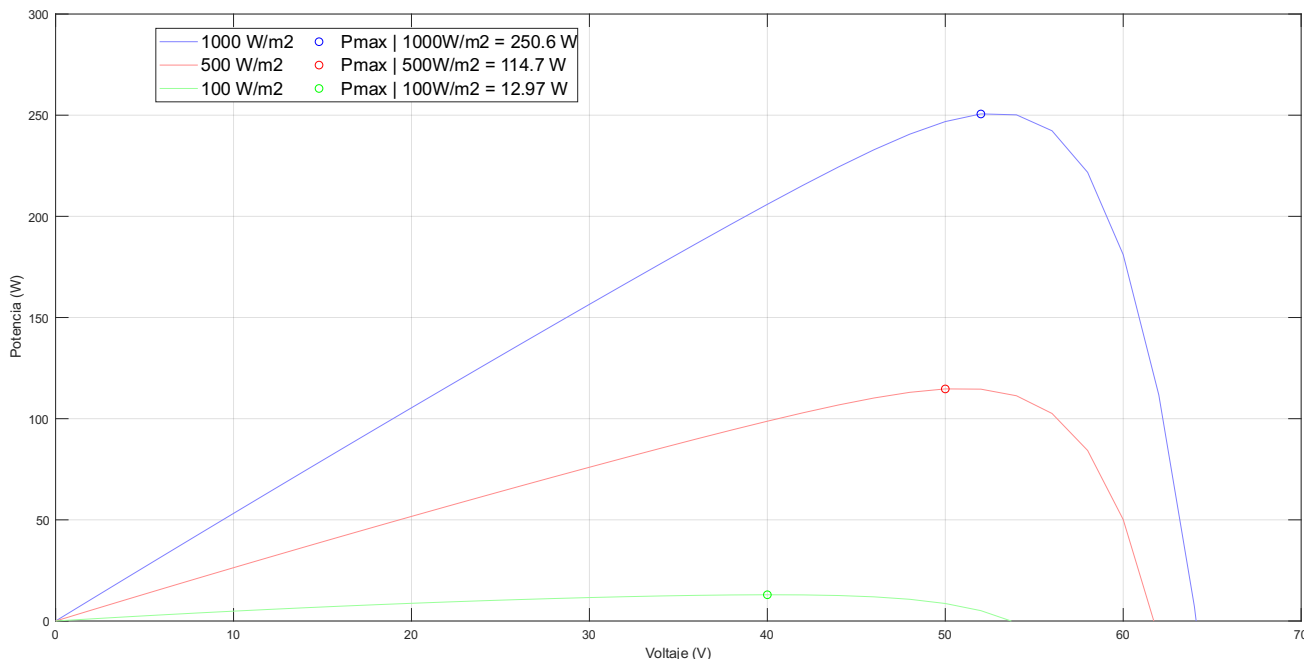
Curvas IV bajo temperatura variable e irradiación constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  para el modelo de dos diodos



Fuente: elaboración propia

Finalmente, en las Figuras 18 y 19 se muestran las curvas PV e IV bajo condiciones variables de irradiancia a una temperatura constante de 25°C para el modelo de dos diodos. En este caso se puede destacar que la irradiancia también tiene el mismo impacto que tiene en el modelo de un diodo, además de la misma exactitud en las STC.

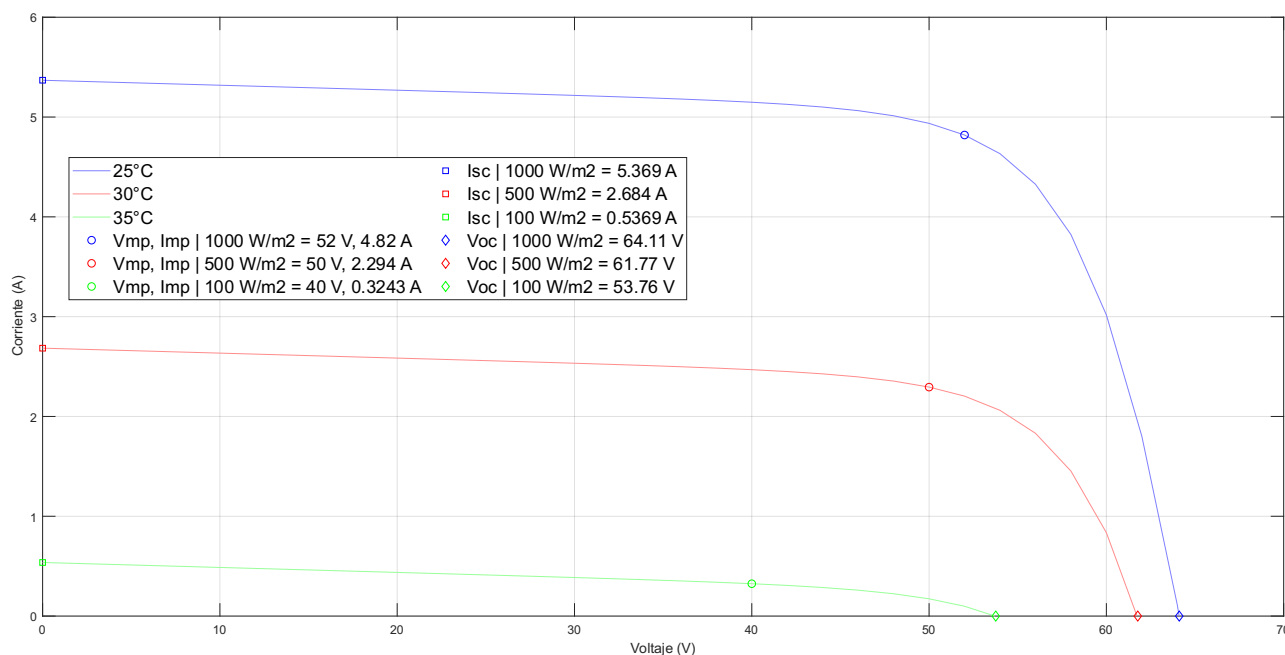
**Figura 18**  
Curvas PV bajo irradiación variable a una temperatura constante de 25°C para el modelo de dos diodos



Fuente: elaboración propia

**Figura 19**

Curvas IV bajo irradiación variable a una temperatura constante de 25°C para el modelo de dos diodos



Fuente: propia



---

## 4. Conclusiones

Se llevó a cabo una comparación entre el modelo de un diodo y el modelo de dos diodos de un módulo solar, en términos de exactitud y de tiempo de cómputo, bajo STC y condiciones variables de temperatura e irradiación, utilizando Matlab/Simulink. La comparación muestra que el modelo de dos diodos, a pesar de requerir más tiempo de cómputo que el modelo de un diodo, tiene una exactitud mayor, respecto a los parámetros eléctricos dados por el fabricante del módulo, en condiciones variables de temperatura e irradiancia.

Se logró establecer que el efecto principal del aumento de temperatura es la reducción del voltaje de circuito abierto, reduciendo así la potencia de salida y la eficiencia energética del módulo solar. Estos resultados reflejan la importancia de las condiciones ambientales del área donde se pretende instalar un módulo solar. Considerando que los modelos se validaron utilizando la temperatura del municipio de Zona Bananera, se recomienda revisar, además de la irradiación solar, la temperatura del lugar de instalación con el fin de obtener la máxima potencia posible para cada módulo fotovoltaico.

Para un trabajo futuro, el grupo de investigación se centrará en la implementación diferentes algoritmos basados en inteligencia artificial, con el fin de obtener los parámetros eléctricos de los modelos, para lo cual se utilizarán sólo los datos consignados en la hoja de especificaciones del fabricante.

## Agradecimientos

Los autores agradecen por el apoyo de los grupos de investigación de la Universidad de la Costa y la Universidad del Magdalena en el proyecto "Investigación de los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático sobre el recurso hídrico, biodiversidad y actividades agropecuarias en el departamento del Magdalena".

---

## Referencias bibliográficas

- Aabrek, V., Forseth, I., Bueno-Lopez, M., & Molinas, M. (2018). Design and Implementation of a Monitoring System for Decision Support in a Micro-Business Based on Solar Energy Microgrid in Rural Colombia. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference, Proceedings*, (págs. 1-8). San Jose. doi:10.1109/GHTC.2018.8601571
- Algarín, C., Fuentes, R., & Castro, A. (2018). Implementation of a cost-effective fuzzy MPPT controller on the Arduino board. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 11(1), 1-10. doi:10.21307/ijssis-2018-002
- Alrahim Shannan, N. M., Yahaya, N. Z., & Singh, B. (2013). Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, (págs. 210-214). Mindeb. doi:10.1109/ICCSC.2013.6719960
- Ćalasan, M., Jovanović, D., Rubežić, V., Mujović, S., & Đukanović, S. (2019). Estimation of Single-Diode and Two-Diode Solar Cell Parameters by Using a Chaotic Optimization Approach. *Energies*, 12, 4209. doi:10.3390/en12214209
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2016). *Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*. Obtenido de Universidad Santo Tomas.
- Franzitta, V., Orioli, A., & Gangi, A. (2017). Assessment of the Usability and Accuracy of Two-Diode Models for Photovoltaic Modules. *Energies*, 10, 564. doi:10.3390/en10040564
- Ibrahim, O., Yahaya, N. Z., Saad, N., & Umar, N. W. (2015). Matlab/Simulink model of solar PV array with perturb and observe MPPT for maximising PV array efficiency. *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, (págs. 254-258). Johor Bahru. doi:10.1109/CENCON.2015.7409549

- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, I. (2014c). *Distribución de la temperatura mínima anual (°C). Promedio multianual 1981-2010*. Obtenido de [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Tmin\\_anual.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Tmin_anual.pdf)
- Li, M., Zhong, D., Ma, T., Kazemian, A., & Gu, W. (2020). Photovoltaic thermal module and solar thermal collector connected in series: Energy and exergy analysis. *Photovoltaic thermal module and solar thermal collector connected in series: Energy and exergy analysis*, 206, 112479. doi:10.1016/j.enconman.2020.112479
- Masmoudi, F., Ben Salem, F., & Derbel, N. (2016). Single and double diode models for conventional mono-crystalline solar cell with extraction of internal parameters. *13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, (págs. 720-728). Leipzig. doi:10.1109/SSD.2016.7473725
- Oliveti, G., Marletta, L., Arcuri, N., De Simone, M., Bruno, R., & Evola, G. (2014). Solar energy. *Green Energy Technol.*
- Ospino-Castro, A., Peña-Gallardo, R., Hernández-Rodríguez, A., Segundo-Ramírez, J., & Muñoz-Maldonado, Y. (2017). Techno-economic evaluation of a grid-connected hybrid PV-wind power generation system in San Luis Potosi, Mexico. *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, (págs. 1-6). Ixtapa. doi:10.1109/ROPEC.2017.8261656
- Pagola, V., Peña, R., Segundo, J., & Ospino, A. (2019). Rapid Prototyping of a Hybrid PV–Wind Generation System Implemented in a Real-Time Digital Simulation Platform and Arduino. *Electronics*, 8, 102. doi:10.3390/electronics8010102
- Pavan Kumar, A. V., Parimi, A. M., & Uma Rao, K. (2014). Performance Analysis of a Two-Diode model of PV cell for PV based generation in MATLAB. *IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, (págs. 68-72). Ramanathapuram. doi:10.1109/ICACCCT.2014.7019191
- Robles Algarín, C., & Rodríguez Álvarez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39(34), 10.
- Robles Algarín, C., Taborda Giraldo, J., & Rodríguez Álvarez, O. (2017). Fuzzy Logic Based MPPT Controller for a PV System. *Energies*, 10, 2036. doi:10.3390/en10122036
- Robles-Algarín, C. A., Taborda-Giraldo, J. A., & Ospino-Castro, A. J. (2018). Procedimiento para la Selección de Criterios en la Planificación Energética de Zonas Rurales Colombianas. *Información tecnológica*, 29(3), 71-80. doi:10.4067/S0718-07642018000300071
- Solarland\_USA. (s.f.). *PV Module SLP250S-96*. Obtenido de [http://www.solarhub.com/solarhub\\_products/34512-SLP250S-96-Solarland-USA](http://www.solarhub.com/solarhub_products/34512-SLP250S-96-Solarland-USA)
- Sultan, S., Tso, C., & Efsan, M. (2020). A new approach for photovoltaic module cooling technique evaluation and comparison using the temperature dependent photovoltaic power ratio. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100705. doi:https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100705
- Unidad de Planeación Minero Energética, U. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia Atlas de Radiación*. Obtenido de [https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas de radiación solar Colombia.pdf](https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas%20de%20radiaci%C3%B3n%20solar%20Colombia.pdf): [https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas de radiación solar Colombia.pdf](https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/Atlas%20de%20radiaci%C3%B3n%20solar%20Colombia.pdf)
- Vera-Dávila, A., Delgado-Ariza, J., & Sepúlveda-Mora, S. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 343-356. doi:10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972

Vergara, P., Rey, J., Osma, G., & Ordóñez, G. (2013). Analysis for Inclusion of Smart Grids Technology in Colombian Electric Power System. *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, (págs. 2357-6618). Medellín.