

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# **Desarrollo de un modelo de representación para celdas fotovoltaicas, operando en modo directo e inverso**

Alejandra Ortiz Pasos

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Tecnólogo en electrónica.

Asesoras

Bonie Johana Restrepo Cuestas

Mariana Durango Flórez

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

Medellín, Colombia

2021

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

En este trabajo se propone un modelo eléctrico para celdas fotovoltaicas, que representa su operación en el primer y segundo cuadrante, comparando los modelos más usados para representar las celdas fotovoltaicas según si modelan el primer cuadrante, el segundo cuadrante o para ambos cuadrantes. En este estudio el modelo de un solo diodo, el modelo de dos diodos y el modelo de Bishop, fueron simulados en Simulink utilizando los mismos parámetros, con respecto al primer cuadrante, para obtener la curva IV. Con base en el comportamiento evidencia tanto en las pruebas experimentales, como con el modelo de Bishop, el modelo se simula en Simulink y luego se comparan sus resultados con la curva obtenida con el modelo de un diodo y el modelo de Bishop. De los resultados se puede concluir la importancia de estimar el conjunto de parámetros de cada modelo, con el fin de obtener una curva estimada que se ajuste mejor a los datos experimentales.

*Palabras clave:* sombreado parcial, Modelo fotovoltaico, Corriente circuito abierto, Voltaje cortocircuito, Curva IV, Resistencia, Fotocorriente, Diodo, Factor de idealidad, Corriente de saturación, Volteje de ruptura

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

Primero que todo quiero agradecer a Dios por la vida y salud que me ha brindado durante este tiempo, quiero agradecerle a mi familia por estar siempre para sin importar por lo que se esté pasando. También quiero agradecerle a la profesora Bonie por que ha sido una persona muy importante en toda mi formación como estudiante y persona, y por ultimo quiero agradecerles a mis asesoras por tenerme tanta paciencia, ya que no me dejaron de ayudar en todo este tiempo y me alentaban a seguir adelante y terminar con el desarrollo de este informe final.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# ACRÓNIMOS

---

FV fotovoltaicas  
 Rs Resistencia serie  
 Rsh Resistencia Shunt  
 I<sub>o</sub> Corriente de saturación del diodo  
 m factor de avalancha  
 V<sub>b</sub> voltaje de ruptura  
 A Factor de idealidad del diodo  
 V<sub>T</sub> Voltaje térmico  
 T Temperatura  
 I<sub>ph</sub> Fotocorriente  
 V<sub>oc</sub> Voltaje circuito abierto  
 I<sub>sc</sub> Corriente cortocircuito

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## TABLA DE CONTENIDO

---

<a href="#"><u>1.INTRODUCCIÓN</u></a>	6
<a href="#"><u>2.MARCO TEÓRICO</u></a>	7
<a href="#"><u>3.METODOLOGÍA</u></a>	13
<a href="#"><u>4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u></a>	14
<a href="#"><u>5.CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO</u></a>	20
<a href="#"><u>REFERENCIAS</u></a>	21
<a href="#"><u>ANEXOS</u></a>	21

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Colombia cuenta con una irradiación promedio de 3.9 kWh/m<sup>2</sup>/día según el atlas de radiación solar, esto quiere decir que está muy por encima de Alemania uno de los países con mayor capacidad solar fotovoltaica instalada, lo cual ha convertido a la tecnología fotovoltaica como una fuente de energía atractiva para el país. Dado que estos sistemas están tomando un lugar importante en la matriz energética nacional, es de suma importancia trabajar en el diseño y la evaluación de este tipo de energía renovable. Teniendo en cuenta que a través del modelado de sistemas fotovoltaicos es posible estimar la potencia generada, conocer el comportamiento de los paneles que lo conforman, encontrar fallas, encontrar el mejor punto de operación cuando hacen parte de aplicaciones como micro redes; es pertinente trabajar en la búsqueda de modelos que permitan evaluar su comportamiento de forma precisa.

En los sistemas fotovoltaicos reales, es posible encontrar condiciones que afectan la potencia entregada por el sistema. Una de las más conocidas es el sombreado parcial, que puede ser generado por elementos cercanos a la instalación; por ejemplo, cuando un solo panel de un arreglo es afectado por una sombra, es posible que este panel sombreado pueda comportarse como una carga del arreglo, es decir, el panel no entregará potencia, sino que por el contrario la consumirá. Así su operación puede dejar de ocurrir en el primer cuadrante (voltaje y corriente positivos), y presentaría una tensión negativa en sus terminales que lo llevaría a trabajar en el segundo cuadrante (corriente positiva y voltaje negativo).

Las características de corriente y voltaje pueden representarse en los cuadrantes 1 y 2. Lo cual puede ser representado a través de modelos circuitales. Algunos de los modelos usados son: el modelo de un diodo y el de dos diodos, estos son los más conocidos, pero no tienen la capacidad de modelar el comportamiento de las celdas en segundo cuadrante. Por otra parte, está el modelo de Bishop y el modelo DRM que permiten representar el comportamiento en ambos cuadrantes.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se plantea proponer un modelo circuital simple, que permita caracterizar una celda fotovoltaica en los cuadrantes 1 y 2. Este modelo será ajustado a través de simulación usando la herramienta Simulink de Matlab y además será validado experimentalmente. Con este trabajo se beneficiará tanto a la línea de investigación de eficiencia energética como a la línea de electrónica y energías renovables.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

---

La celda solar convierte la energía que proviene del sol en electricidad y es la unidad básica en un sistema fotovoltaico. Las celdas FV (fotovoltaicas) están hechas de materiales semiconductores. Existen cinco tipos de tecnología las cuales son (Mineros Alvarado, 2017):

- Silicio Monocristalino (Mono-Si): Esta tecnología tiene una eficiencia del 15% hasta del 21%, en algunos casos supera el 21%
- Silicio Policristalinas (Poli-Si): Esta tecnología tiene una eficiencia entre el 13% y el 16%
- Silicio Amorfo: Esta tecnología tiene una eficiencia entre el 8% y el 12%
- Diselenurio de Cobre e Indio (CIS): Esta tecnología tiene una eficiencia del 13% hasta el 18%
- Telurio de Cadmio (CdTe): Esta tecnología tiene una eficiencia hasta del 8%

Las celdas de silicio son las más utilizadas en la industria, estas tienen un umbral de radiación solar para su activación más o menos desde  $200 \frac{W}{m^2}$  hasta  $1000 \frac{W}{m^2}$ , cabe resaltar que las celdas monocristalinas pueden producir energía eléctrica a irradiaciones menores de  $200 \frac{W}{m^2}$  pero, esto será prácticamente despreciable ya que la potencia obtenida es muy pequeña (Flores & Domínguez, 2017).

Una celda FV puede producir aproximadamente una potencia cercana a los 4W, con un voltaje de 0.5V y una corriente entre 7A y 8A. La curva Corriente-Voltaje de una celda FV es importante ya que representa pares de valores de voltaje y corriente en los que puede encontrarse el funcionamiento de la celda, a su vez, representa el comportamiento típico en la salida de un dispositivo fotovoltaico (celda, módulo, panel o sistema) (Rodríguez, n.d.).

En la Figura 1 se muestra la relación de la corriente con respecto al voltaje que es la curva de color azul y la de color amarillo es la de potencia-voltaje. Esta gráfica se puede obtener cuando se hace un barrido de corriente o de voltaje en los terminales de una celda, de forma experimental o desde simulación usando un modelo que represente el comportamiento de una celda fotovoltaica (Jiménez, 2017).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

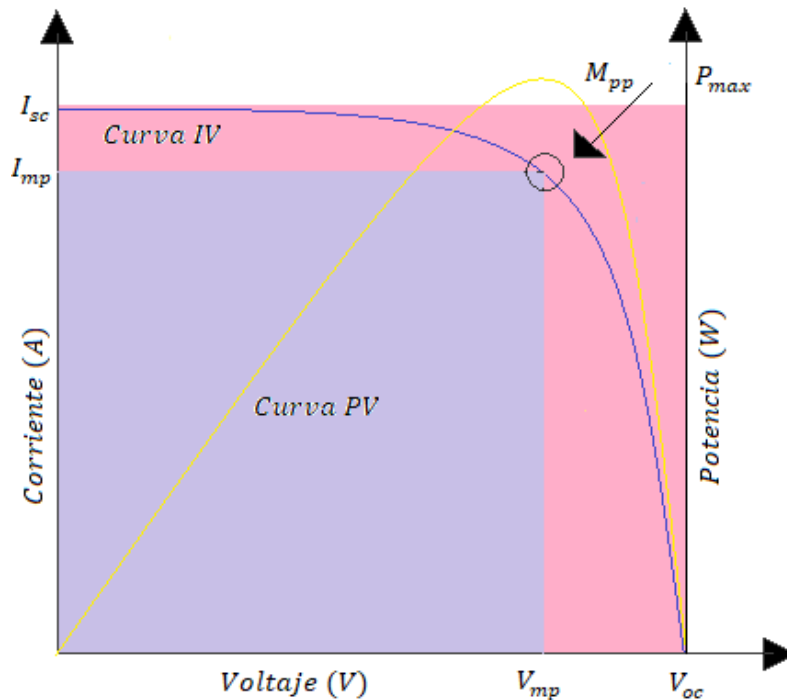


Figura 1. Curva Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje. Fuente: Autor.

En el eje X de la Figura 1 se puede encontrar la tensión a la potencia máxima ( $V_{mp}$ ), que es la tensión a la que está disponible la potencia máxima ( $P_{max}$ ) en el módulo o celda, la tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) que es la tensión máxima disponible de una celda solar y esto hace que la corriente sea cero, el punto de máxima potencia ( $M_{pp}$ ) es el punto en la curva de corriente-voltaje de un módulo bajo iluminación, donde el producto de la corriente y el voltaje es máximo.

En el eje Y se puede encontrar la corriente a la potencia máxima ( $I_{mp}$ ), que es la corriente a la cual la  $P_{max}$  del módulo está disponible, la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) que es la corriente a través de la celda solar cuando con una tensión igual a 0V en sus terminales (la celda solar está cortocircuitada).



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

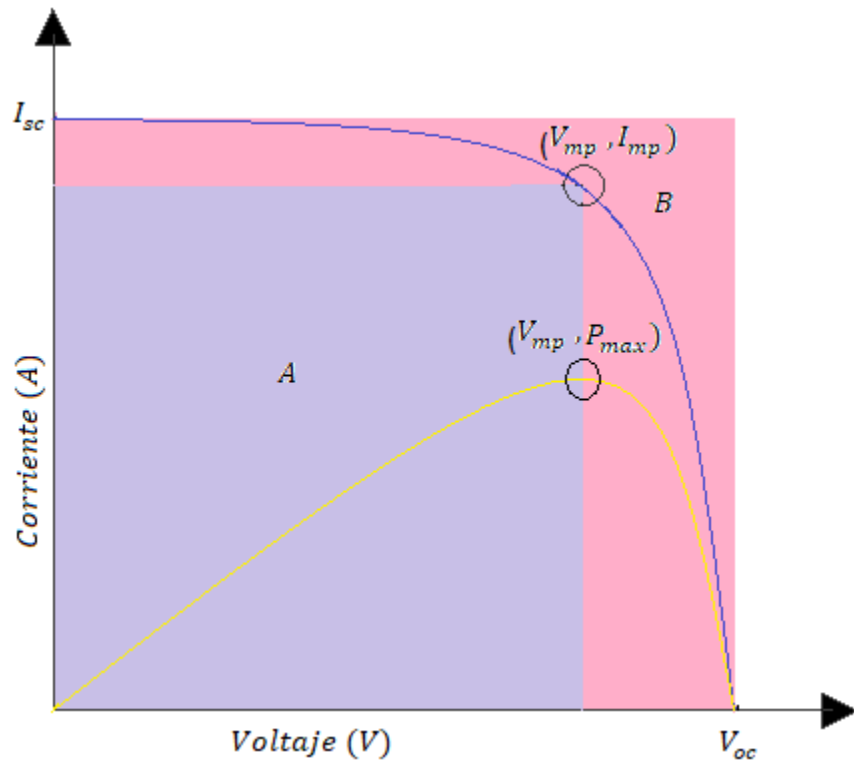


Figura 2. Representación gráfica de factor de relleno. Fuente: Autor.

En la Figura 2 se muestra el factor de relleno ( $FF$ ) coloreado en azul, el cual relaciona el máximo punto de potencia (zona A) dividido entre el voltaje en circuito abierto y la corriente de cortocircuito (zona B). Cuanto más se aproxime el factor de relleno a 1 significa que la potencia real de la celda se acerca a la potencia ideal de la misma, denotando un índice de mayor calidad en la celda (Herrera Salcedo, 2013).

Con la siguiente ecuación se calcula ( $FF$ ):

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{\text{area A}}{\text{area B}} \quad \text{Ecuación 1}$$

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

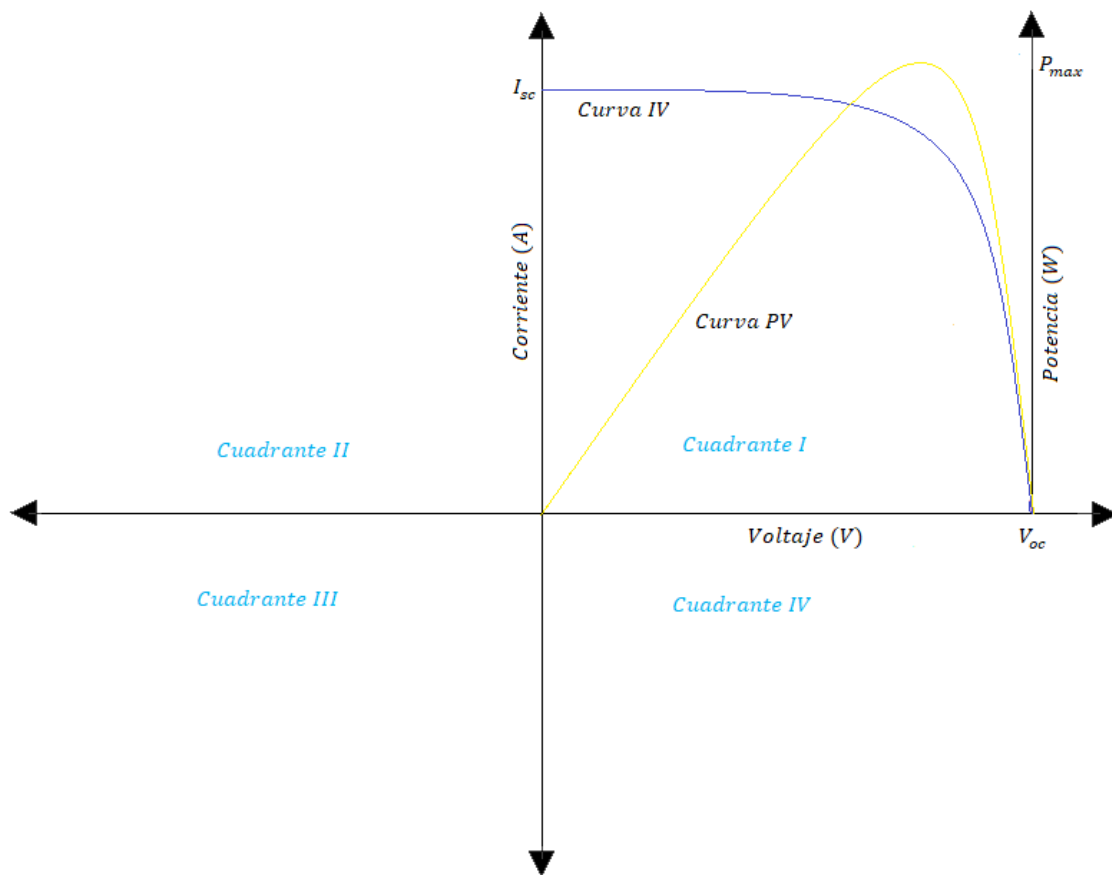


Figura 3. Curva Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje en el primer cuadrante. Fuente: Autor.

La Figura 3 representa el comportamiento de la celda en el primer cuadrante, que es cuando una celda trabaja como un generador (entrega voltaje y corriente). Sin embargo, por una celda no suele alimentar una carga por sí sola, para alimentar una carga se necesita de un conjunto de celdas conectadas. En la literatura se encuentran varios modelos que representan este comportamiento, en este trabajo solo se analizará el modelo de un diodo y el modelo de dos diodos.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

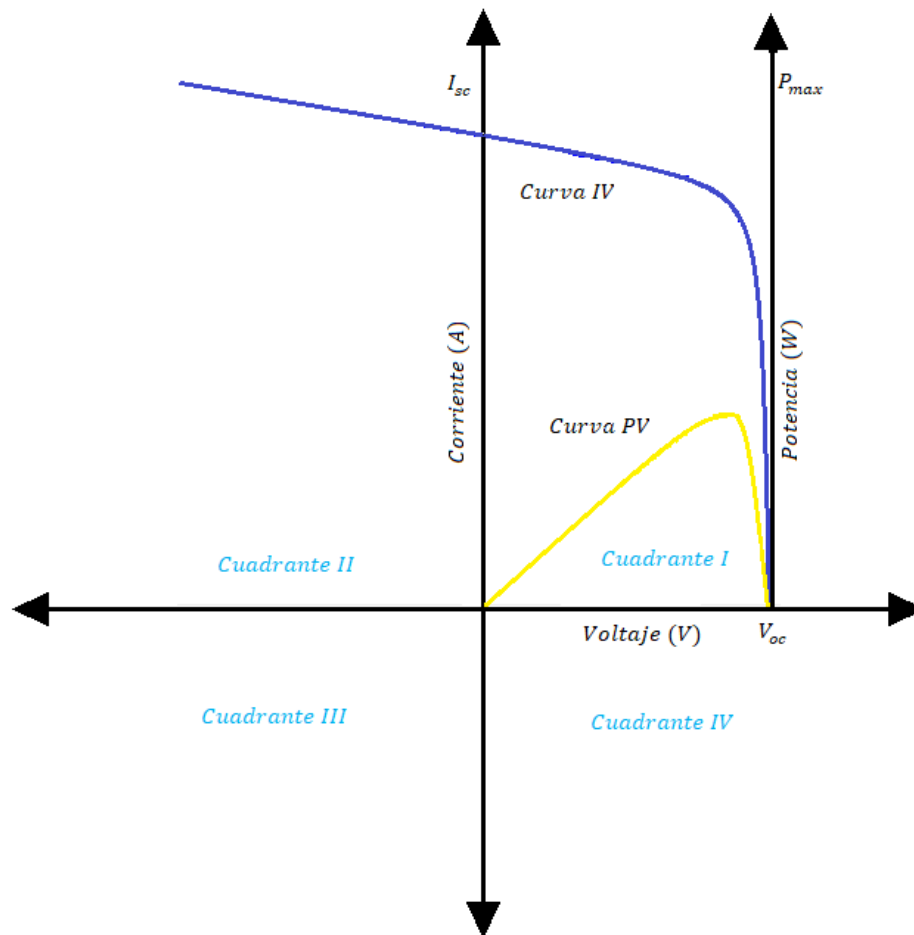


Figura 4. Curva Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje en el primer y segundo cuadrante.  
Fuente: Autor.

La Figura 4 representa el comportamiento de una celda PV en el primer y segundo cuadrante. Como se puede observar en el primer cuadrante, la corriente y el voltaje siempre son positivos, sin embargo, en el segundo cuadrante tanto el voltaje como la potencia toman valores negativos. Una celda trabaja en segundo cuadrante cuando está bajo la condición de mismatching, es decir, a causa de defectos en la fabricación de la celda o al trabajar bajo condiciones de sombreado parcial se presenta una diferencia en los parámetros eléctricos de las demás celdas del conjunto con respecto a la celda que se encuentra bajo sombreado, estas condiciones hacen que la celda tome una corriente fotovoltaica menor a las demás y se polarice inversamente, así toma valores de voltajes negativos. En la literatura se puede encontrar modelos que representan este comportamiento, en este trabajo solo se analizará el modelo de Bishop (Alonso Lorenzo, n.d.).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2.1 Modelo de un solo diodo

El modelo de un solo diodo también conocido como modelo de cinco parámetros, es el modelo FV más utilizado para la representación del comportamiento de una celda en el primer cuadrante (voltaje y corriente positiva) (Koffi et al., 2015).

En este modelo representativo, cada componente del circuito representa un parámetro eléctrico de la celda FV. Este modelo lo conforman (Gimeno Sales et al., 2014):

- Una fuente de corriente DC, que representa la fotocorriente o corriente generada por la radiación solar ( $I_{ph}$ )
- La representación de la unión de semiconductores de tipo P y N (junturas) a través de un diodo, por el cual circula una corriente ( $I_d$ ) y tiene un voltaje ( $V_d$ )
- Una resistencia serie ( $R_s$ ) es la resistencia que contiene el volumen del material y de contacto. Los valores típicos para esta resistencia están entre  $0.05 \Omega$  y  $0.3 \Omega$  para una tecnología de silicio amorfo (a-Si) con unión P-N. Esta resistencia tiene un impacto de reducir el factor de relleno, pero se debe tener en cuenta que valores muy altos puede hacer que se reduzca la corriente de cortocircuito (Christina & Stuart, n.d.-b).
- Una resistencia Shunt ( $R_{sh}$ ) (fuga o paralelo), es la resistencia que representa la no linealidad de la unión p-n y las impurezas cerca de la unión, los valores típicos están entre  $200 \Omega$  y  $800 \Omega$ .

Según lo descrito, cabe de resaltar que la resistencia ( $R_{sh}$ ), suele tener un valor muy elevado con respecto a la resistencia ( $R_s$ ) ya que el rango de la resistencia Shunt es desde  $200 \Omega$  hasta  $800 \Omega$  y el de la resistencia serie es de  $0.05 \Omega$  y  $0.3 \Omega$ .

En la Figura 5 se muestra el modelo circuital de un solo diodo con los componentes anteriormente mencionados.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

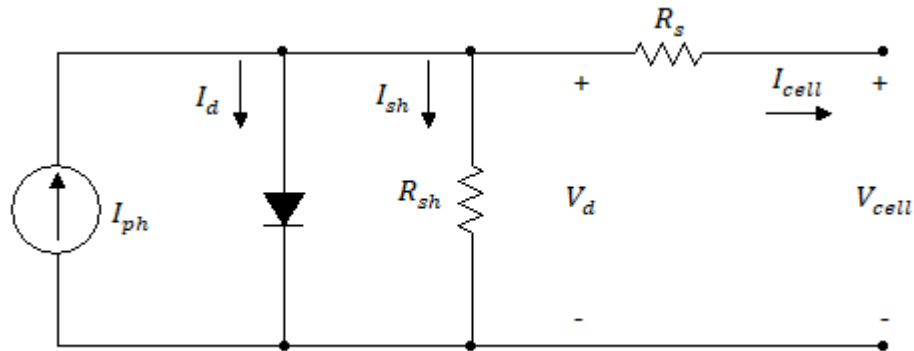


Figura 5. Modelo de un diodo. Fuente: Autor.

Para calcular la corriente producida por la celda, se aplica la ley de Kirchhoff de corrientes en alguno de los nodos donde se encuentra conectada la fotocorriente (ver Ecuación 2).

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{Ecuación 2}$$

La relación que existe entre el voltaje y la corriente en el diodo es exponencial, y se emplea la Ecuación 3, la cual es conocida como ecuación de Shockley para su representación (Koffi et al., 2015).

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{A * V_T}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo:

- $A$  el factor de idealidad del diodo
- $V_T$  es el potencial térmico

Para calcular el potencial térmico se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_T = \frac{K * T}{q} \quad \text{Ecuación 4}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Siendo:

- $K$  la constante de Boltzman, la cual tiene un valor de  $1.3806 * 10^{-23} \frac{J}{K}$
- $T$  es la temperatura de la celda en grados Kelvin
- $q$  es la carga del electrón  $1.6022 * 10^{-19} C$

Para calcular la corriente a través de la resistencia Shunt ( $I_{sh}$ ) se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{sh} = \frac{V_{cell} + I_{cell} * R_s}{R_{sh}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Con las ecuaciones presentadas anteriormente se obtiene los siguientes cinco parámetros  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_0$ ,  $A$  y  $I_{ph}$ , los cuales representan al modelo de un solo diodo.

## 2.2 Modelo de dos diodos

El modelo de dos diodos, también conocido como modelo de siete parámetros también es utilizado para representar una celda en el primer cuadrante (voltaje y corriente positiva), este modelo es más exacto para simular celdas fotovoltaicas ya que tiene la ventaja de dar mejores resultados de acuerdo con los experimentales (Garcia Barrientos, 2016). Este modelo se puede conectar con la tecnología policristalina.

Este modelo representativo es similar al modelo de un solo diodo, la diferencia que tiene es que se adiciona un diodo, como se muestra en la Figura 6, ( $I_{01}$ ) es la corriente de saturación del diodo 1 esta causa que la corriente que circula por el diodo cambie y por lo tanto también se modifique el voltaje de circuito abierto.

En la Figura 6 se muestra el modelo circuital de dos diodos con donde se representan una corriente ( $I_{ph}$ ), una resistencia ( $R_{sh}$ ), una resistencia ( $R_s$ ) y dos diodos en paralelos.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

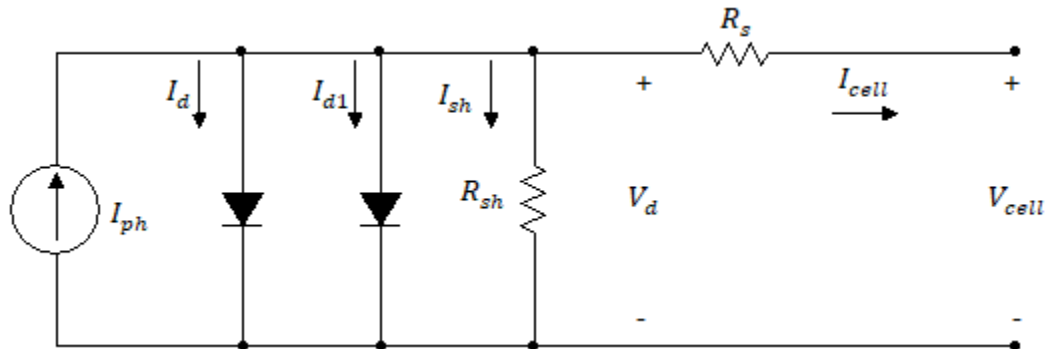


Figura 6. Modelo de dos diodos. Fuente: Autor.

Para calcular la corriente generada por la celda, se realiza la sumatoria de corrientes en el nodo superior donde se encuentra conectada la fuente  $I_{ph}$ , obteniendo la Ecuación 6. La relación que existe entre la corriente y el voltaje para los diodos D y 1 se obtiene a través de la Ecuación 3, esta relación se conoce como la ecuación de Shockley (Ortiz Núñez et al., 2020).

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{d1} - I_{sh} \quad \text{Ecuación 6}$$

Para hallar cada corriente se pueden utilizar las ecuaciones que se emplearon en el modelo de un diodo, ya que la representación es la misma (se implementa desde la Ecuación 3 hasta la Ecuación 5 haciendo su respectivo reemplazo si es para el diodo D o el diodo 1).

Este segundo diodo es implementado para obtener mejores resultados en comparación con la implementación de un solo diodo, ya que se incluye para modelar una recombinación unión. Al implementar este diodo también se modifica  $A_1$  con respecto al  $A$  (este se deja estable ya que el primer diodo por lo general tiene un factor de idealidad constante). Este tiene una  $I_{01}$  que va desde  $1 * 10^{-10}A$  hasta  $1 * 10^{-7}A$  y un  $A_1$  de 0.01 hasta 2 (García Barrientos, 2016).

Con las ecuaciones presentadas anteriormente se obtiene los siguientes siete parámetros  $R_s, R_{sh}, I_{0d}, A, I_{01}, A_1$  y  $I_{ph}$ , los cuales representan al modelo de dos diodos.

### 2.3 Modelo de Bishop

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El modelo Bishop es el modelo FV generalmente utilizado para la representación del comportamiento que tiene una celda en el primer y segundo cuadrante se basa en el modelo de cinco parámetros previamente descrito en el numeral 2.1. Su principal diferencia es que este plantea una fuente de corriente controlada en paralelo con  $R_{sh}$ , la cual se requiere para representar el voltaje negativo y modelar el comportamiento de la celda en segundo cuadrante. Bishop plantea que la responsable del comportamiento del segundo cuadrante es la corriente de  $R_{sh}$  y es afectada por el factor de avalancha ( la Ecuación 8 y la Ecuación 9 muestran este proceso) (Belhadj et al., 2017). En la Figura 7 se muestra el modelo circuital de un Bishop con los componentes anteriormente mencionados.

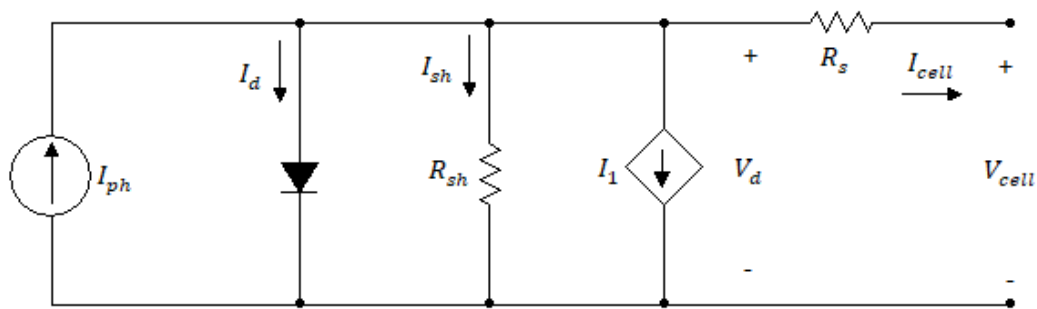


Figura 7. Modelo de Bishop. Fuente: Autor.

Para calcular la corriente generada por la celda, puede aplicarse la ley de Kirchhoff de corrientes en alguno de los nodos donde se encuentra conectada la fotocorriente. (Ver Ecuación 7 )

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} - I_1 \quad \text{Ecuación 7}$$

Para hallar las corrientes  $I_{ph}$  y  $I_d$  se emplean las ecuaciones utilizadas por el modelo de un diodo (se implementa desde la Ecuación 3 hasta la Ecuación 4 realizando su respectivo reemplazo).

Para hallar la corriente  $I_{sh}$  (esta corriente consiste en un término Óhmico y un factor de multiplicación no lineal), se utiliza la siguiente ecuación (Fezzani et al., 2014).



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

- $V_{sh}$  es el voltaje de  $R_{sh}$ .

Teniendo la corriente  $I_{sh}$ , se puede calcular  $I_1$ , realizando su respectivo despeje se tiene la siguiente ecuación:

$$I_1 = \left( \frac{V_{sh} * a}{R_{sh}} * \left( 1 - \frac{V_{sh}}{V_b} \right)^{-m} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

- $a$  es la fracción óhmica de la corriente involucrada en la ruptura de la avalancha, la cual los valores típicos son de 0.002 (Orozco Gutierrez et al., 2014) hasta 0.9 (Wen et al., 2019) aproximadamente.
- $V_b$  es el voltaje de ruptura de la unión, el cual tiene unos los valores típicos son de -10V hasta -30V aproximadamente (Hadj Mahammed et al., 2017).
- $m$  es la avalancha que descompone el exponente, los valores típicos son de 2.5 (Wen et al., 2019) hasta 4 (Andrianajaina et al., 2016) aproximadamente .

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 3. METODOLOGÍA

---

A continuación, se presentan las actividades desarrolladas que permitieron el cumplimiento de cada objetivo:

### **Objetivo específico 1:**

- Se realizó una búsqueda en la literatura de los modelos eléctricos más usados para representar las celdas fotovoltaicas.
- Se clasificaron los modelos que permiten evaluar el comportamiento en primer cuadrante, en segundo y en ambos cuadrantes.
- Se estudió el modelo de un solo diodo ya que es el más conocido y usado para la representación del primer cuadrante.
- Se simuló el modelo de un solo diodo en Simulink utilizando parámetros de la literatura.
- Se estudió y modeló el modelo de Bishop para la representación del primero y segundo cuadrante con parámetros de la literatura.

### **Objetivo específico 2:**

- Se realizaron pruebas experimentales para la obtención de curvas corriente-voltaje en celdas, teniendo en cuenta mediciones de temperatura y de radiación.
- Se procesaron las señales para obtener las curvas IV que contengan información en primer y segundo cuadrante.

### **Objetivo específico 3:**

- Después de analizar las curvas corriente y voltaje, y de analizar el sentido físico de los parámetros de los modelos anteriores, se propuso un modelo que represente el primer y segundo cuadrante en una celda.
- Se simuló el modelo en Simulink y se analizó el comportamiento del modelo conforme se ajustaban sus parámetros.
- Se compararon los resultados obtenidos con la evaluación del modelo de un solo diodo (ambos trabajando en el primer cuadrante) y con respecto al modelo de Bishop (ambos trabajando en el primer y segundo cuadrante), usando datos experimentales.
- Para finalizar se escribieron todas las actividades en el formato de informe final.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los modelos estudiados se realizó a través de la herramienta Simulink, a continuación se describen los resultados encontrados para cada modelo.

### 4.1 Análisis del modelo de un diodo a través de simulación:

Para el modelo de un diodo, se empleó el circuito de la Figura 5, usando como parámetros  $R_s = 0.02\Omega$ ,  $R_{sh} = 10\Omega$ ,  $I_{ph} = 0.5A$  y  $V_{OC} = 0.58V$ , después de emplear estos valores se varió  $R_s$  el cual se puede observar en la Figura 8 y  $R_{sh}$  en la Figura 9, esto se realizó para ver el impacto de cada una de las resistencias en la curva de la celda.

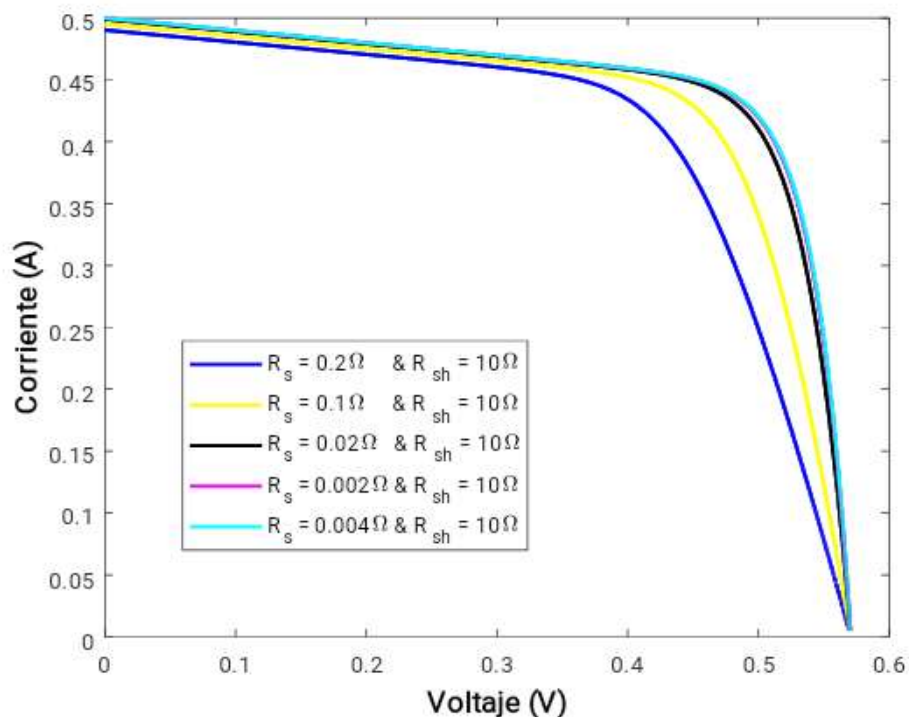


Figura 8. Curva IV con  $R_s$  variable. Fuente: Autor.

En la Figura 8 se muestra la curva del modelo de un solo diodo donde se varía la  $R_s$  siendo la de color negro la curva de referencia. Es posible observar que al disminuir  $R_s$  lo disminuye el factor de relleno de la celda, sin realizar cambios significativos en la corriente de cortocircuito. Si  $R_s$  se aumenta esto causa que la corriente de cortocircuito se reduzca

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

(Christina & Stuart, n.d.-b). También se puede observar que la curva tiene dos partes lineales las cuales corresponden a los cortes con el eje X y el eje Y. Para esta variación, se ve más afectada la pendiente de la parte que corta con el eje X ya que siempre se desea que tenga un voltaje de circuito abierto siempre (normalmente se desea que la línea siempre se establezca en un mismo punto del eje X y esto hace que cambie la pendiente de esa línea).

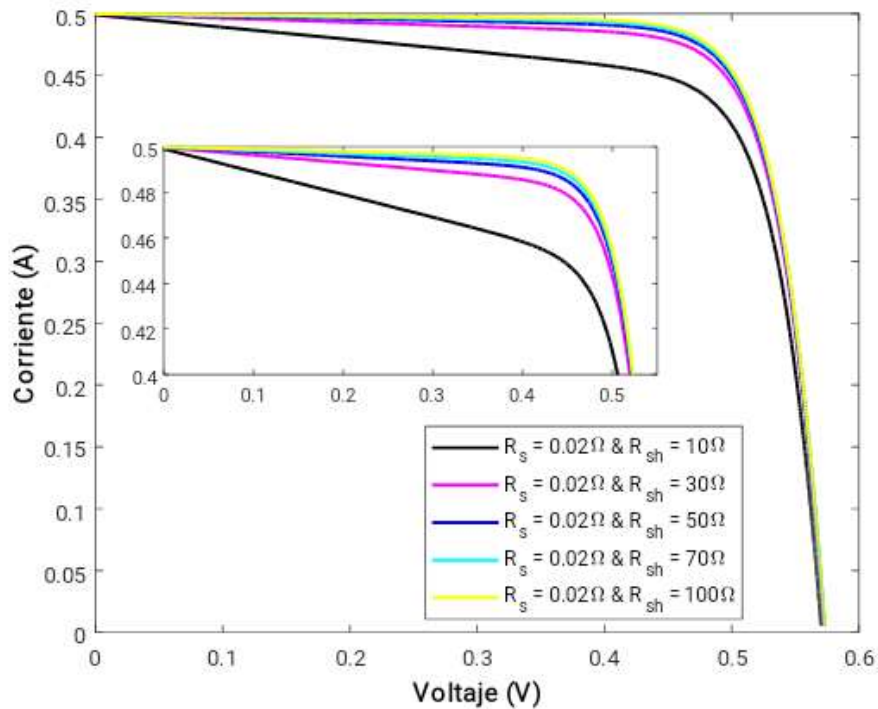


Figura 9. Curva IV con  $R_{sh}$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 9 se observa la curva del modelo de un solo diodo donde se varía  $R_{sh}$ . La Figura 9 muestra que al disminuye  $R_{sh}$  se disminuye la corriente y tensión de la celda solar y, si  $R_{sh}$  se aumenta, se realizan cambios muy pequeños en la corriente ( $I_{sc}$ ) y el voltaje ( $V_{oc}$ ) (Christina & Stuart, n.d.-c). Para la Figura 8 y la Figura 9, se puede observar que, para lograr el comportamiento de la IV de una celda,  $R_s$  debe ser mucho menor que  $R_{sh}$ . También se puede observar que la curva tiene dos partes lineales las cuales corresponden a los cortes con el eje X y el eje Y, en donde se ve más afectado la pendiente de la parte que corta con el eje Y ya que siempre se desea que mantenga la misma corriente (normalmente se desea que la línea siempre se establezca en un mismo punto del eje Y, y esto hace que cambie la pendiente de esa línea).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

#### 4.2 Analisis del modelo de dos diodos a través de simulacion:

Para el modelo de dos diodos, se empleó el circuito de la Figura 6, con  $R_s = 0.02\Omega$ ,  $R_{sh} = 10\Omega$ ,  $I_{ph} = 0.5A$  y  $V_{OC} = 0.58V$ , despues de emplear estos valores se vario  $R_s$  el cual se puede observar en la Figura 10 y  $R_{sh}$  en la Figura 11.

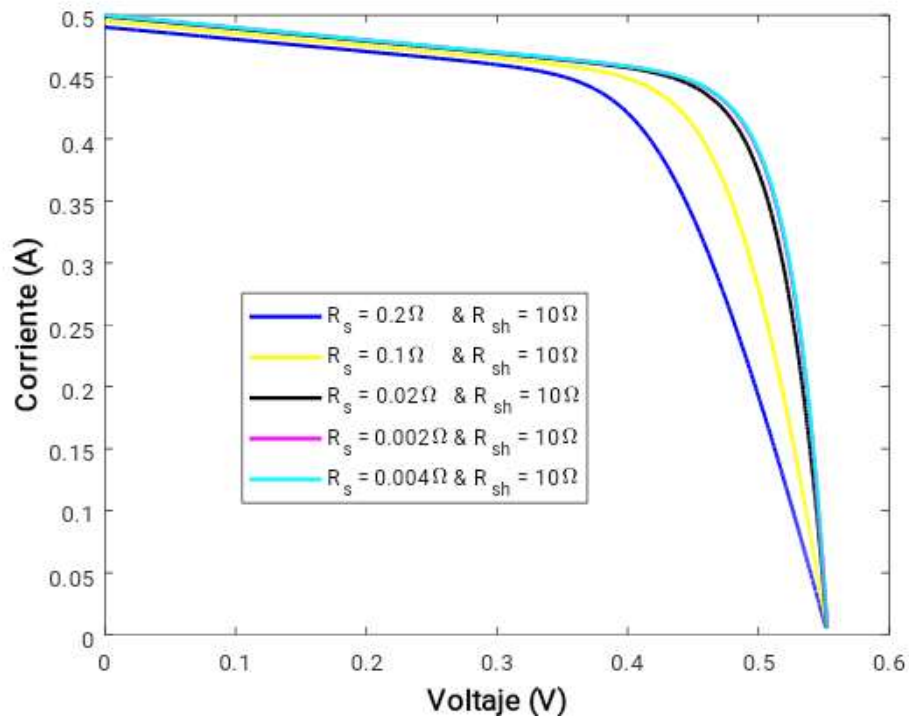


Figura 10. Curva IV con  $R_s$  variable. Fuente: Autor.

En la Figura 10 se muestra la curva del modelo de dos diodos donde se varía la resistencia serie siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 10 se puede ver que tiene el mismo comportamiento que la curva del modelo de un diodo, ya que  $R_s$  representa las pérdidas debido al paso de la corriente a través de los contactos resistivos del material semiconductor (Salamanca Céspedes, 2012). Esta Figura 10 también tiene dos partes lineales las cuales corresponden a los cortes con el eje X y el eje Y, la misma pendiente de la Figura 8.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

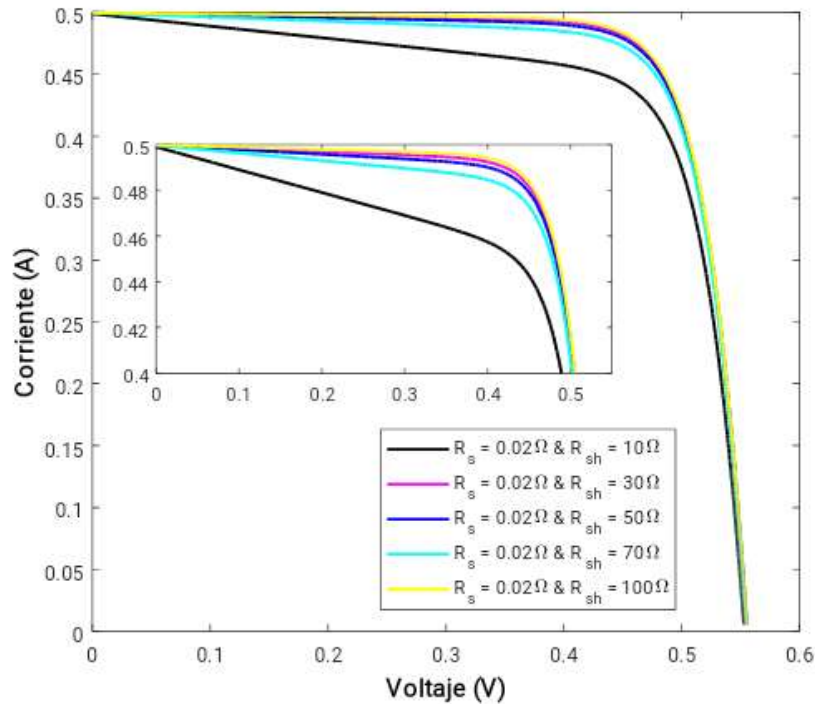


Figura 11. Curva IV con  $R_{sh}$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 11 se observa la curva del modelo de un solo diodo donde se varia  $R_{sh}$  la cual simboliza las pérdidas tales como cortos localizados en la capa emisora o a lo largo del perímetro de la celda (Salamanca Céspedes, 2012). Al observar la Figura 11 se puede ver que tiene el mismo comportamiento que la curva del modelo de un diodo, inclusive con la misma pendiente de la Figura 9. Después de observar el comportamiento de la Figura 6 variando  $R_s$  y  $R_{sh}$ , mostrado anteriormente en la Figura 10 y en la Figura 11, se empleó un nuevo análisis del modelo de dos diodos en el cual se realizó, a través de Simulink, con  $R_s = 0.02\Omega$ ,  $R_{sh} = 10\Omega$ ,  $I_{ph} = 0.5A$ ,  $V_{OC} = 0.58V$ ,  $A = 1$ ,  $A_1 = 1$ ,  $I_0 = 1 * 10^{-10}A$  y  $I_{01} = 1 * 10^{-10}A$ , después de emplear estos valores se varió  $A_1$  el cual se puede observar en la Figura 12 y  $I_{01}$  en la Figura 13.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

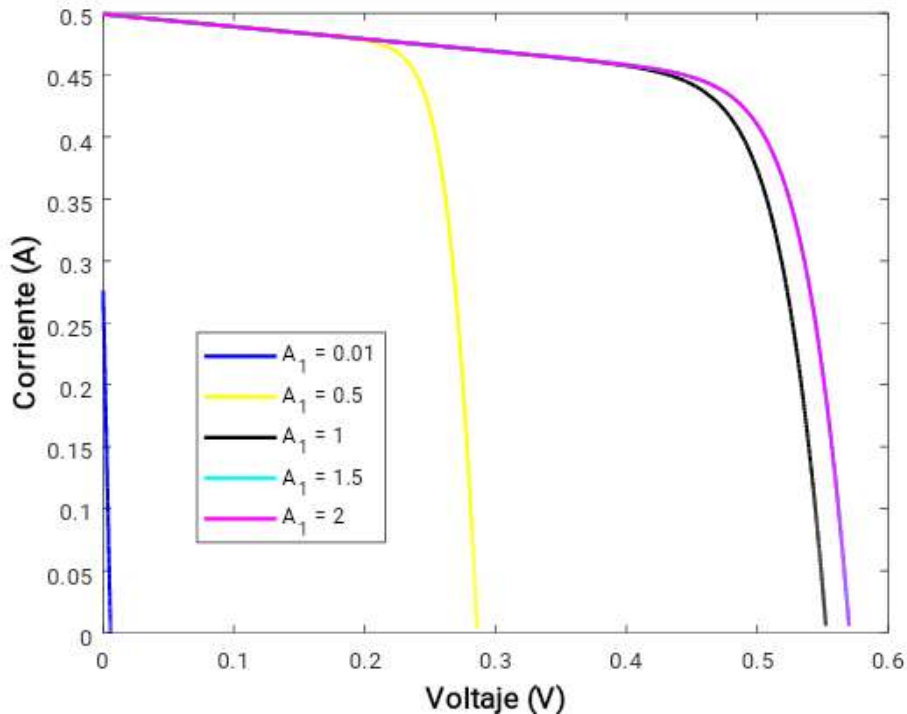


Figura 12. Curva IV con  $A_1$  variante y  $I_{01} = 1 * 10^{-10} A$  . Fuente: Autor.

En la Figura 12 se muestra la curva del modelo de dos diodos donde se varía el factor de idealidad del diodo 1 siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 12, se puede ver que si se disminuye  $A_1$ , el punto  $V_{OC}$  varía, sin presentar distorsiones en la curva, ya que el factor de idealidad es una medida de que tan cerca el diodo de la celda sigue la ecuación del diodo ideal (Christina & Stuart, n.d.-a). También se puede observar que la curva tiene dos partes lineales las cuales corresponden a los cortes con el eje X y el eje Y, en donde se ve afectado ambas pendientes (la parte que corta con el eje X y la parte que corta con el eje Y) al cambiar el factor de idealidad.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

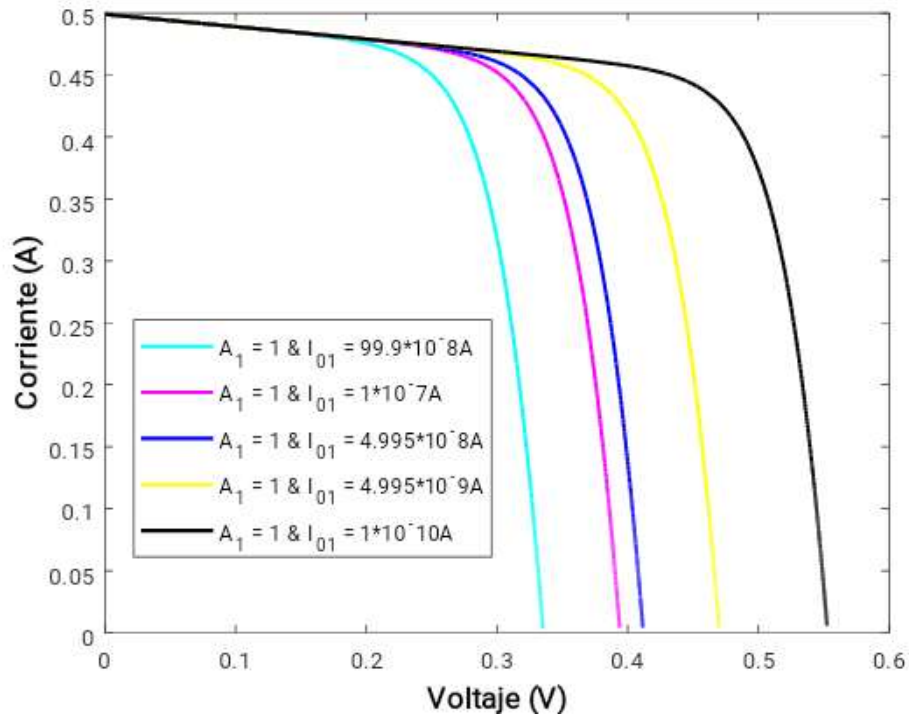


Figura 13. Curva IV con  $I_{01}$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 13 se muestra la curva del modelo de dos diodos donde se varía la corriente de saturación del diodo 1 siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 13, se puede ver que si se varía  $I_{01}$ ,  $V_{OC}$  varía, pero sin presentar deformaciones en la curva, ya que la corriente de saturación es una pequeña corriente la cual hace que el diodo siga la ecuación del diodo ideal poniendo algunas restricciones. También se puede observar que la curva tiene dos partes lineales las cuales corresponden a los cortes con el eje X y el eje Y, en donde se ve afectada la pendiente que corta con el eje Y, ya que como se cambia la corriente de saturación esto causa un cambio en la corriente que pasa por el diodo, pero siempre haciendo que tenga un comportamiento normal y así mismo en el voltaje de circuito abierto.

#### 4.3 Análisis del modelo de Bishop a través de simulación:

Para el modelo de Bishop se empleo el circuito de la Figura 7, con  $R_s = 0.02\Omega$ ,  $R_{sh} = 10\Omega$ ,  $I_{ph} = 4.3A$ ,  $V_{OC} = 0.58V$ ,  $a = 0.1$ ,  $m = 3$  y  $V_b = -20V$ , despues de emplear estos valores se varió  $a$  el cual se puede observar en la Figura 14,  $m$  en la Figura 15 y  $V_b$  en la Figura 16, esto se realizó para ver el impacto de cada parámetro en el segundo cuadrante de la curva de la celda.



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

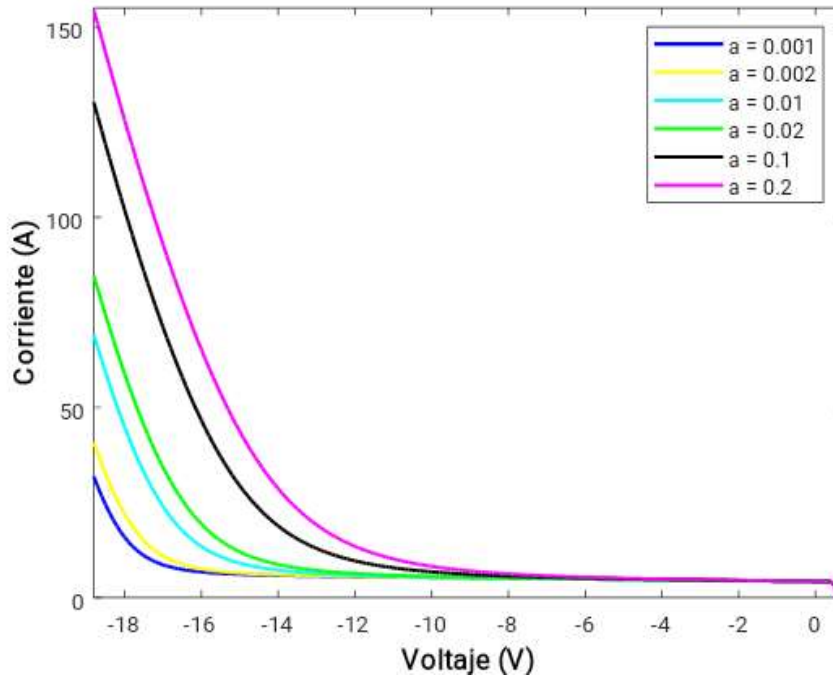


Figura 14. Curva IV con  $a$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 14 se observa la curva del modelo Bishop donde se varía  $a$  siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 14, se nota que la corriente donde comienza el decrecimiento exponencial aumenta al mismo tiempo que  $a$ , el voltaje de ruptura inicial es igual para cualquier valor de  $a$  (Fezzani et al., 2014).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

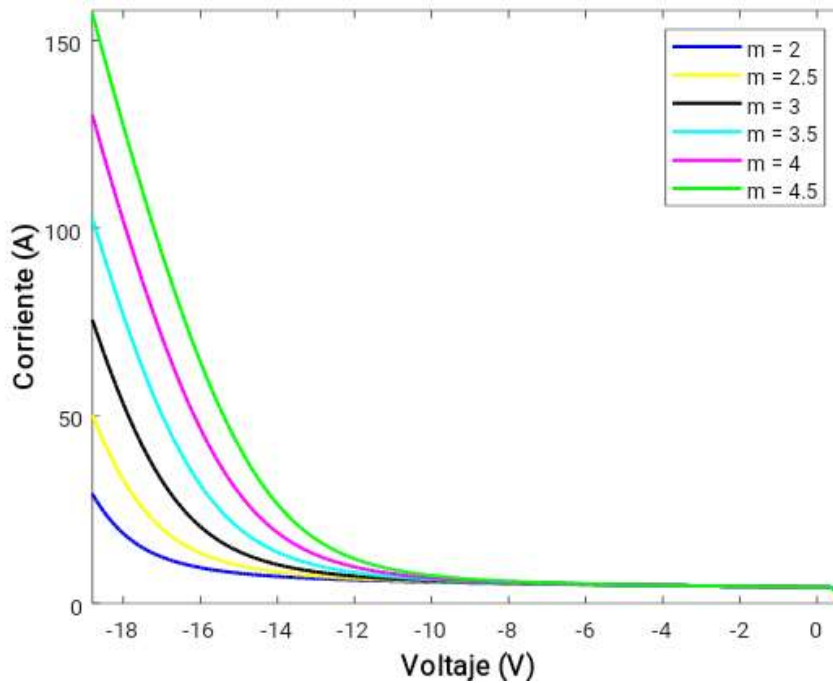


Figura 15. Curva IV con  $m$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 15 se observa la curva del modelo Bishop siendo  $m$  la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 15 se puede ver que la curva tiene el mismo comportamiento que cuando se varía  $\alpha$ . Teniendo en cuenta todo lo anterior se puede decir que la pendiente es más lineal entre más grande sea  $m$  (Fezzani et al., 2014).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

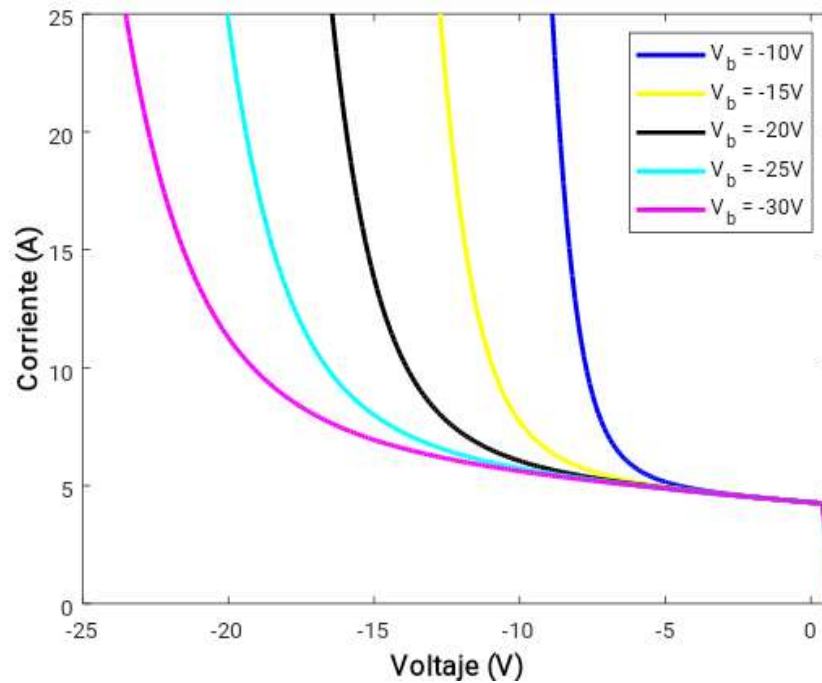


Figura 16. Curva IV con  $V_b$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 16, se observa la curva del modelo Bishop afectada por variaciones en  $V_b$  siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 16, se puede observar cómo afecta la curva un cambio en el voltaje de ruptura, dicho voltaje dependerá de la tecnología de la celda (Fezzani et al., 2014).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

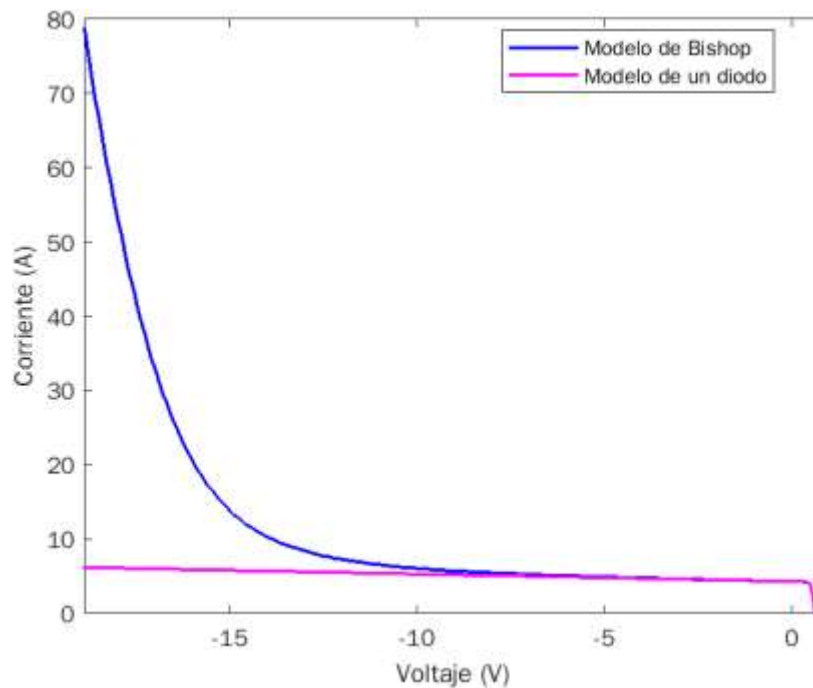


Figura 17. Modelo de Bishop y modelo de un diodo. Fuente: Autor.

En la Figura 17, se observa la curva del modelo de Bishop y la curva del modelo de un diodo, en ella se puede observar que en el primer cuadrante ambos modelos trabajan de igual manera (la curva tienen el mismo comportamiento), mientras que en el segundo cuadrante solo el modelo de Bishop tiene la capacidad de reproducir el comportamiento de una celda, en esta etapa el voltaje decrece conforme aumenta la corriente hasta llegar al voltaje de ruptura (Fezzani et al., 2014).

Después de analizar el comportamiento de la curva para una celda tanto en primer como en segundo cuadrante, y de analizar los parámetros de los modelos estudiados en las secciones anteriores, se propone un modelo simple que se nombrará modelo anti-paralelo para representar el comportamiento que tiene una celda en el primer y segundo cuadrante.

#### 4.4 Modelo anti-paralelo

El modelo tiene un circuito de representación que se muestra en la Figura 18, y a continuación se enuncian los elementos que lo conforman:

- Una fuente de corriente DC, que representa la fotocorriente o corriente generada por la radiación solar ( $I_{ph}$ ). Este es un parámetro similar al usando en el modelo de un diodo y en el modelo de Bishop.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Un diodo por el cual circula una corriente ( $I_d$ ) y tiene un voltaje ( $V_d$ ). Este diodo se representará a través de la corriente de saturación y del factor de idealidad, tal como se realiza en el modelo de un diodo y en el modelo de Bishop.
- Un diodo en anti-paralelo por el cual circula una corriente ( $I_{d\_inv}$ ), tiene un voltaje ( $V_{d\_inv}$ ) y un factor de idealidad ( $A_{inv}$ ). Este diodo se incluye para poder representar la forma exponencial del comportamiento en segundo cuadrante.
- Una fuente de voltaje DC, que representa un voltaje negativo ( $V$ ) en la curva IV, que pretende ajustarse al voltaje de ruptura de la celda, parámetro similar al presentado en el modelo de Bishop.

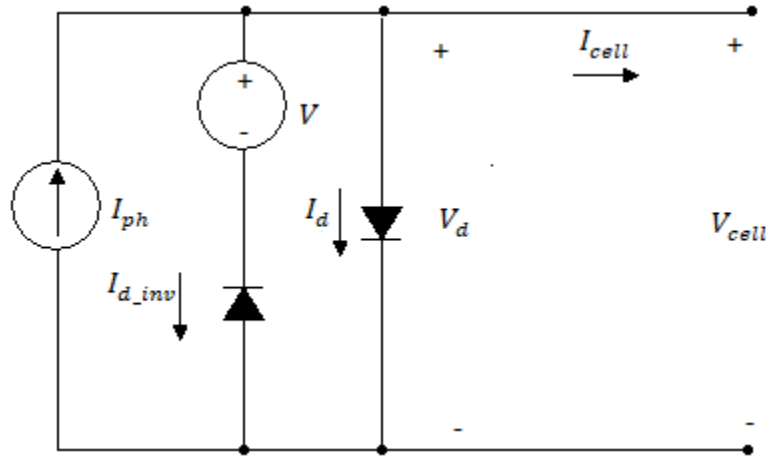


Figura 18. Modelo Anti-paralelo. Fuente: Autor.

- **Análisis a través de simulación:**

En el modelo anti-paralelo propuesto se empleó el circuito de la Figura 18, con  $I_{ph} = 0.5A$ ,  $V_{OC} = 0.58V$ ,  $I_0 = 1 * 10^{-10}A$ ,  $I_{0\_inv} = 1 * 10^{-10}A$ ,  $A = 1$ ,  $A_{inv} = 1.5$  y  $V = -20V$  (estos valores fueron usados como valores de referencia).

Este modelo es un modelo ideal que no tiene resistencias que reflejen las pérdidas por contactos y demás fenómenos físicos. En la Figura 19 se puede observar el circuito del modelo anti-paralelo.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

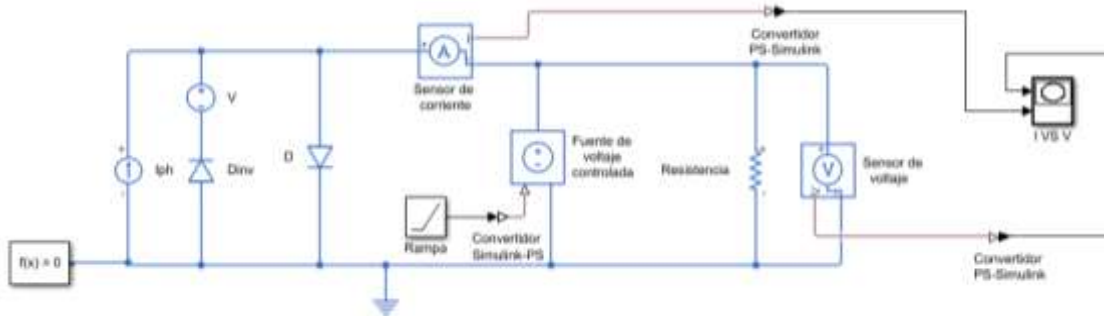


Figura 19. Esquemático en Simulink. Fuente: Autor.

En la Figura 19 se observa el esquemático del modelo anti-paralelo, el cual se utilizó para simular y obtener las curvas. Este circuito lo conforman:

- $I_{ph}$  que es la fuente de fotocorriente
- $D_{inv}$  es el diodo conectado anti-paralelo
- $V$  que es la fuente de voltaje negativo
- $D$  que es el diodo de todos los modelos
- *Sensor de corriente* que es el multímetro de Simulink en este caso mide la corriente de corto circuito.
- *Rampa* es la que impone desde donde comienza a trabajar el circuito el voltaje menor que puede utilizarse), se debe poner el valor del voltaje de ruptura el cual es la fuente  $V$  en serie con el diodo  $D$  que está conectado en anti-paralelo
- *Convertidor Simulink – PS* este convierte lo datos de tipo Simulink a PS para que el circuito lo pueda leer
- *Fuente de voltaje controlada* que es la que ayuda a que la curva comience desde un voltaje negativo
- *Resistencia* que se utiliza como carga
- *Sensor de voltaje* que es el multímetro de Simulink en este caso mide el voltaje de circuito abierto. (o más bien el voltaje de la celda)
- *I vs V* que es el osciloscopio de Simulink en este caso grafica la curva IV.

En la Figura 20 se puede observar la curva que arroja la Figura 19 al ser simulada con los valores de referencia.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

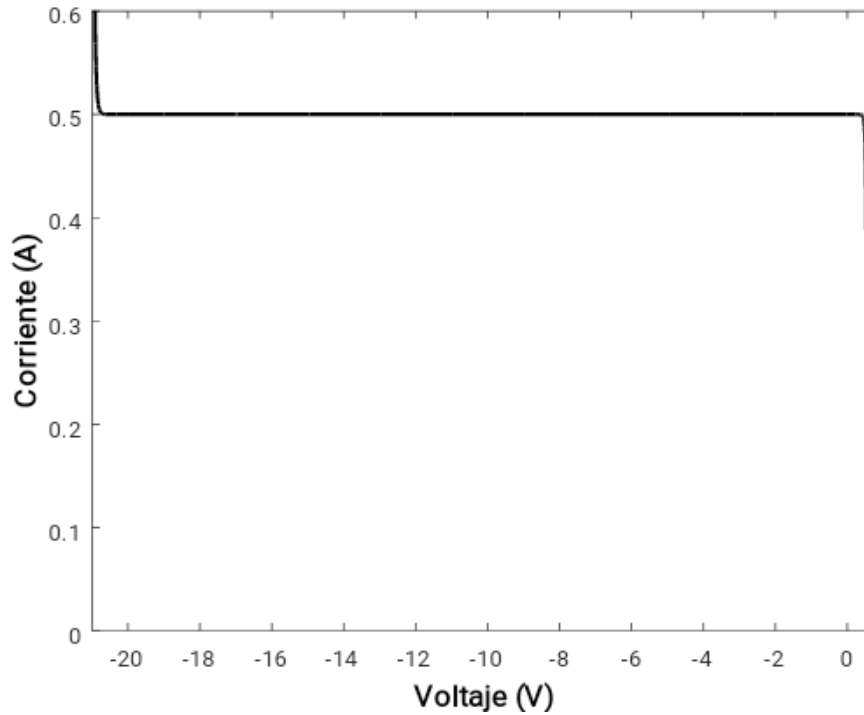


Figura 20. Curva IV del modelo anti-paralelo. Fuente: Autor.

En la Figura 20, se observa la curva del modelo anti-paralelo, este modelo trabaja tanto en el primer como en el segundo cuadrante. Este es un modelo menos complejo ya que es más fácil de implementar y analizar debido a que no tiene tantos elementos y componentes como lo tienen los modelos anteriormente descritos. Para modelar el primer cuadrante se utilizó el mismo factor de los modelos anteriormente descritos el cual se puede observar en la Figura 21.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

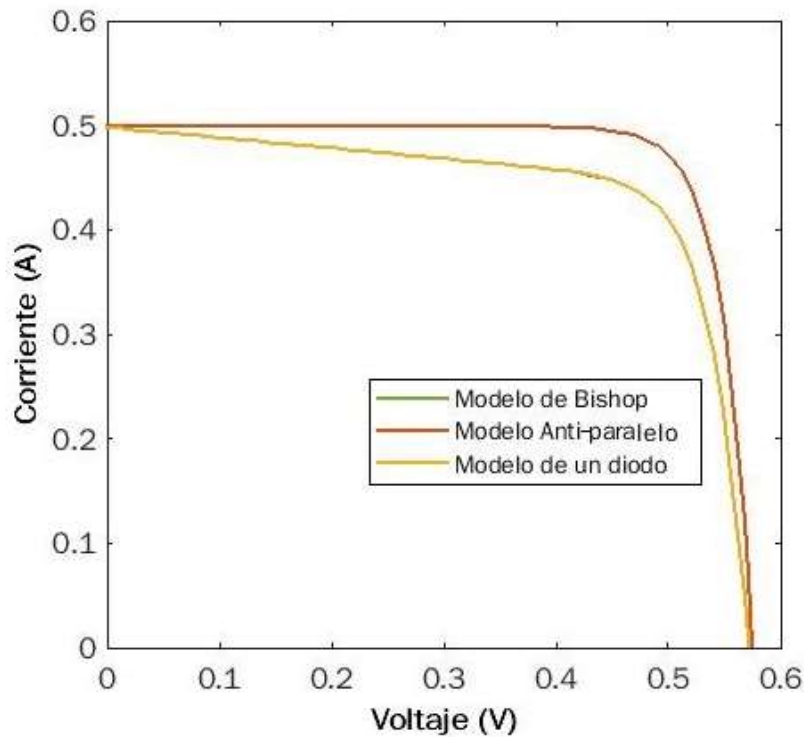


Figura 21. Curva IV primer cuadrante de los modelos estudiados. Fuente: Autor.

En la Figura 21 se observa la curva del modelo anti-paralelo, la curva del modelo de Bishop y la curva del modelo de un diodo siendo la de color rojo la de anti-paralelo, la de color verde la de Bishop y la de color naranja la de un diodo. Allí se puede ver que el comportamiento en el primer cuadrante del modelo anti-paralelo es similar al de los otros dos (la curva del modelo de Bishop y la de un diodo son idénticas), ya que tienen el mismo comportamiento, pero no trabajan de la misma manera porque el modelo es ideal y esta curva debe ser parecida a la curva del diodo. En este caso el modelo trabaja con la corriente y el voltaje indicados, pero se demora un poco más en hacer la caracterización, por este motivo se ve el desfase con respecto a la curva de los otros dos modelos.

Después de emplear estos valores se varió  $I_{0\_inv}$  el cual se puede observar en la Figura 22,  $A_{inv}$  en la Figura 23 y  $V$  en la Figura 24, esto se realizó con el fin de ver el impacto de cada parámetro en el segundo cuadrante de la curva de la celda.



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

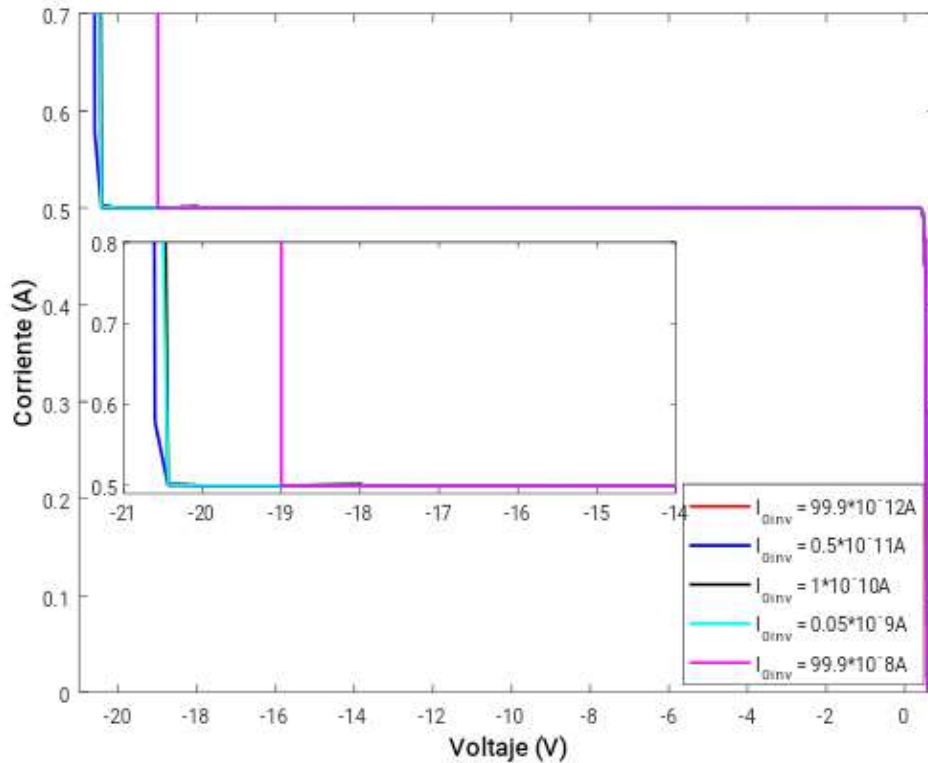


Figura 22. Curva IV con  $I_{0\_inv}$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 22, se muestra la curva del modelo anti-paralelo donde se varia la corriente de saturación del diodo conectado inversamente, siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 22, se puede ver que si se varía  $I_{0\_inv}$  lo que ocurre en la curva es que varía el voltaje de ruptura, pero sin deformaciones en la curva. También se puede observar que la curva tiene tres partes lineales las cuales corresponden a los cortes con el eje X, el eje  $-X$  y el eje Y, donde se ve que la corriente de saturación afecta las pendientes que se encuentran en el segundo cuadrante ( la parte que corta en el eje  $-X$  y la parte que corta con el eje Y) ya que como se varia la corriente de saturación del diodo conectado en inversa, esto causa un cambio en el codo que se forma en el segundo cuadrante ya que entre más pequeña sea la corriente más pequeño será el voltaje de ruptura.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

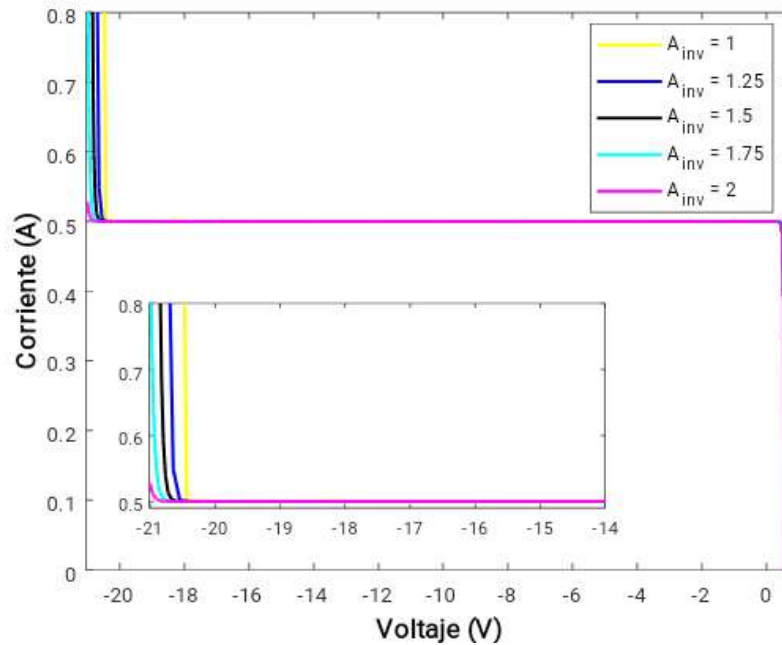


Figura 23. Curva IV con  $A_{inv}$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 23, se muestra la curva del modelo anti-paralelo donde se varía el factor de idealidad del diodo que está conectado inversamente siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 23, se puede observar que si se disminuye  $A_{inv}$ , varía el punto de voltaje de ruptura y el codo que se forma en el segundo cuadrante se hace más lineal formando un ángulo de  $90^\circ$ , sin presentar deformaciones en la curva. También se puede ver que la curva tiene tres partes lineales las cuales corresponde a los cortes con el eje X, el eje  $-X$  y el eje Y, donde se observa que el factor afecta las pendientes que se encuentran en el segundo cuadrante ( la parte que corta en el eje  $-X$  y la parte que corta con el eje Y). Al variar el factor de idealidad del diodo conectado en inversa, hay un cambio en la corriente que pasa por el diodo y así mismo en el voltaje de ruptura sin tener cambios significativos en el primer cuadrante.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

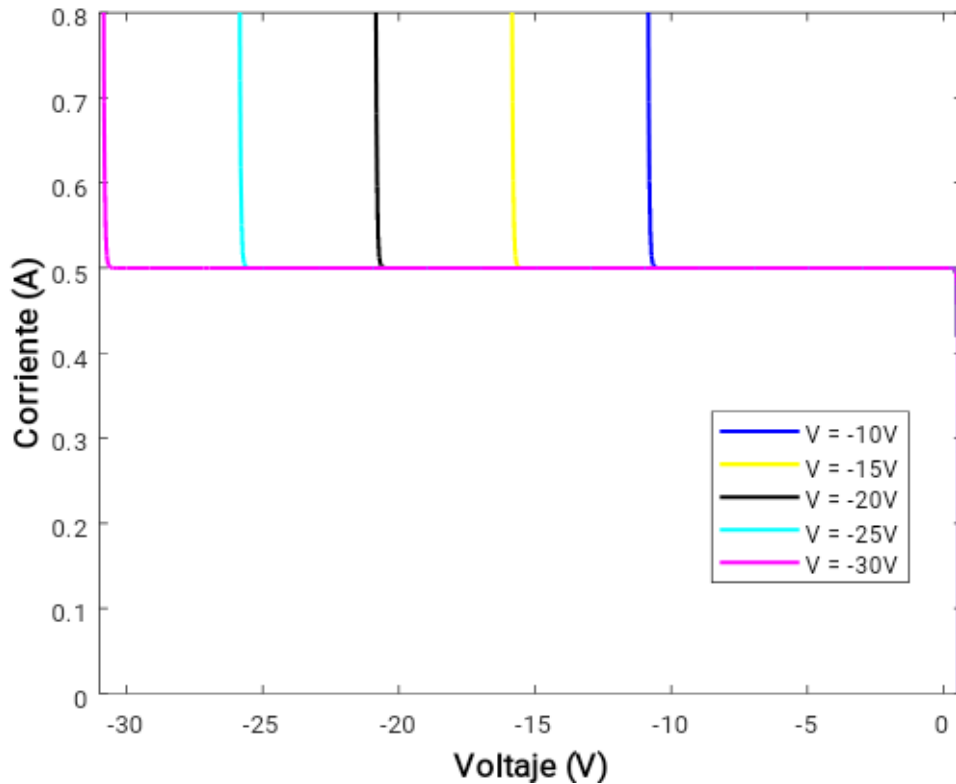


Figura 24. Curva IV con  $V$  variante. Fuente: Autor.

En la Figura 24, se observa la curva del modelo anti-paralelo afectado por variaciones en  $V$  siendo la de color negro la curva de referencia. Al observar la Figura 24 se puede ver que la corriente donde comienza el decrecimiento exponencial es igual para cualquier valor del voltaje de ruptura, como también se puede observar que cada vez que  $V$  (la fuente de voltaje) es más pequeño, el voltaje de ruptura también lo es, la parte lineal de la curva comienza desde un voltaje de ruptura y en una corriente más pequeña.

Después de observar todos los resultados arrojados por el modelo anti-paralelo se concluyó que los rangos de trabajo son:

- $I_{0\_inv}$  es de  $99.9 * 10^{-11} A$  hasta  $99.9 * 10^{-8} A$
- $A$  es de 1 hasta 2
- $V$  es de  $-10V$  hasta  $-30V$

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

#### 4.4 Pruebas experimentales

Para realizar las pruebas experimentales se utilizó un arreglo de 17 celdas conectadas en serie, una carga electrónica DC para realizar el barrido de voltaje al arreglo de celdas, también se utilizó un osciloscopio para adquirir la señal de voltaje y la señal corriente del arreglo y de una de las celdas, un multímetro para medir temperatura y un medidor de irradiación.

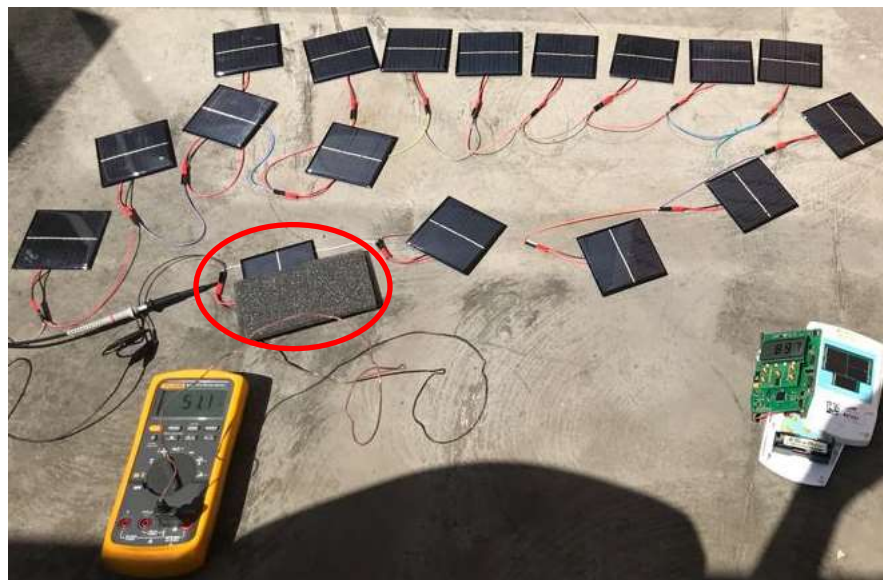


Figura 25. Arreglo de celdas para prueba experimental. Fuente: Autor.

En la Figura 25 se puede observar el arreglo de celdas que se utilizó para obtener los datos, como se puede ver el multímetro de color amarillo que se empleó para medir la temperatura y el medidor de irradiación que es el de color blanco. También cabe decir que la celda que se encuentra con la sombra (señalada con un círculo rojo) fue la celda elegida para tomarle la medición del voltaje. Después de haber tomado los datos tanto del arreglo como de la celda se procedió a importarlos a Matlab y graficarlos como se muestra en la Figura 26.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	04
			Fecha	24-02-2020

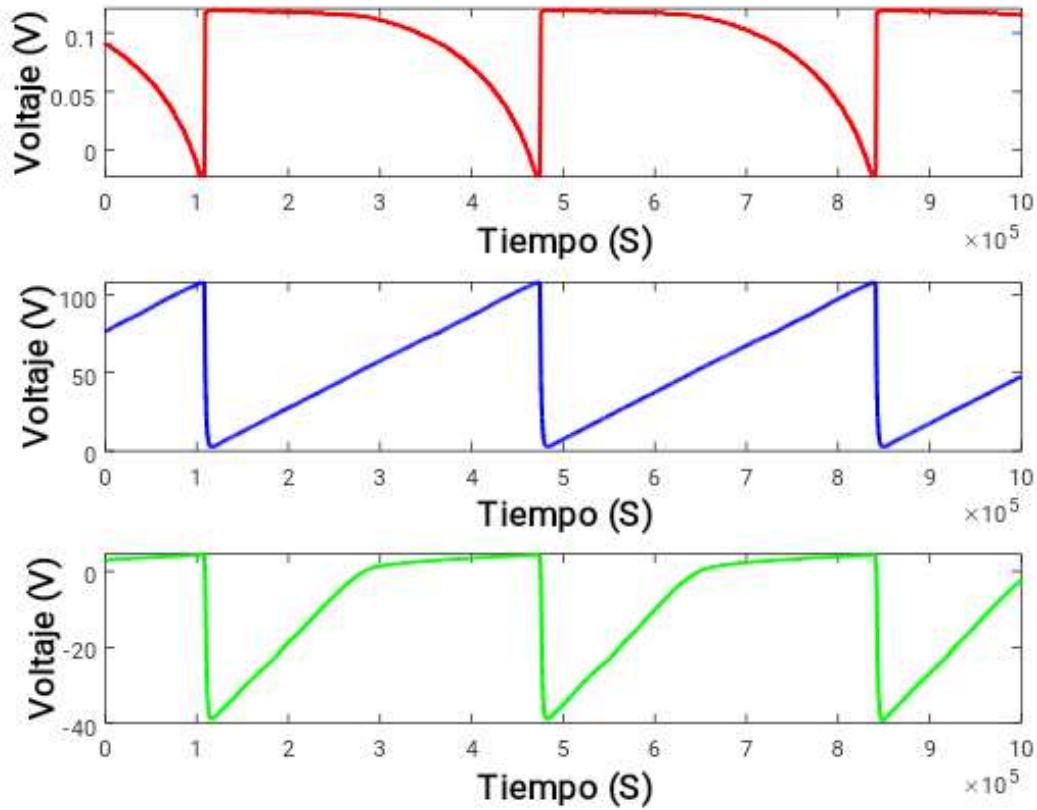


Figura 26. Señales obtenidas con los datos importados a Matlab. Fuente: Autor.

En la Figura 26 se muestra las señales obtenidas con los datos de la que se pasaron a Matlab. Donde la señal de color rojo es *Iarreglo*, la de color azul es *Varreglo* y la de color verde es *Vcelda* como se puede observar. Luego, se selecciona un rango de datos que incluya una curva IV completa para proceder con su análisis de la celda. En la Figura 27 se muestra la curva IV del arreglo y en la Figura 28 se muestra la curva IV.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

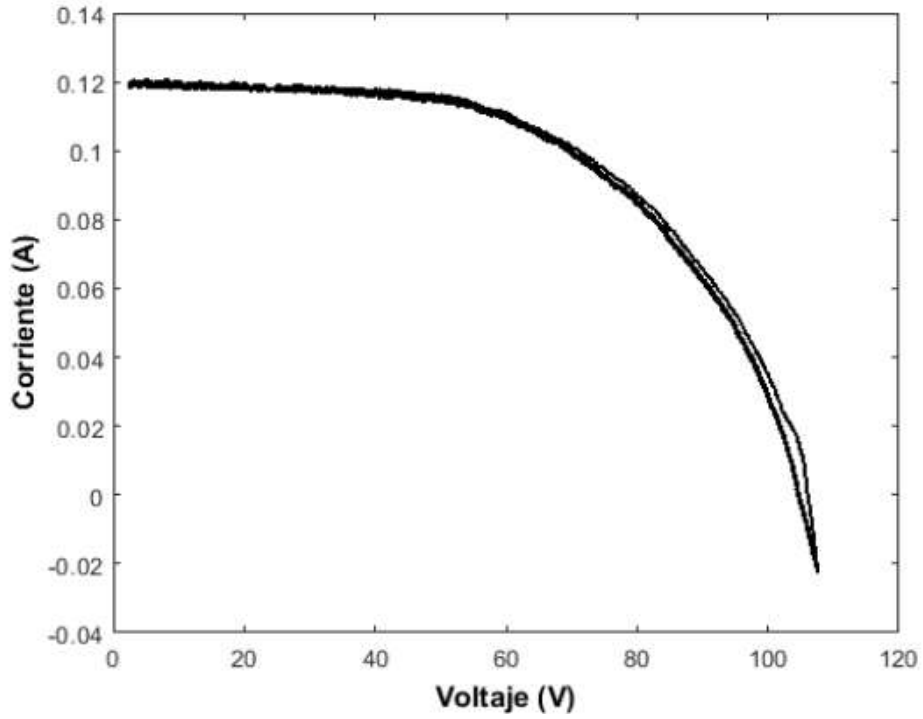


Figura 27. Curva del arreglo. Fuente: Autor.

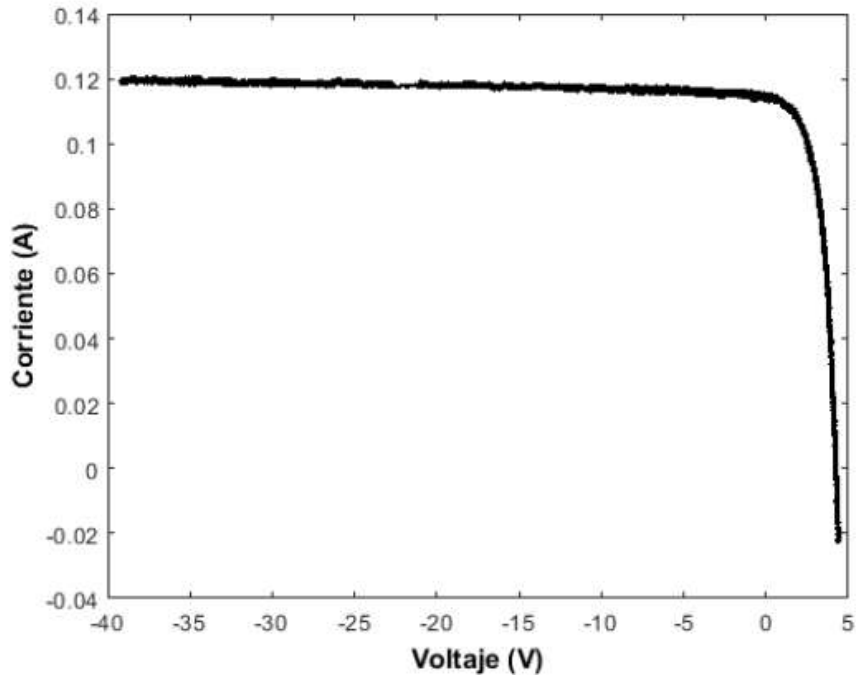


Figura 28. Curva de la celda. Fuente: Autor.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Después de tener las gráficas y los valores de voltaje del arreglo, corriente del arreglo y voltaje de la celda, se realizó un pequeño código que permite tomar un número reducido de datos por curva, pasando de 359872 datos a 997 datos aproximadamente. El código se mostrará en la Figura 29. Donde  $V_{fcorto}$  es el voltaje del arreglo,  $V_{corto}$  es el voltaje en la celda e  $I_{corto}$  es la corriente del arreglo (todos estos son con menos datos). Después de tener cada señal con menos datos se procedió a suavizar cada curva, esto se realizó con un pequeño código el cual se muestra en la Figura 30 y en la Figura 31.

```

%Voltaje en el arreglo
Vfcorto=round(length(Vf)/10000); %1000
k=1;
for i=1:Vfcorto:length(Vf)
  Vf1(k,:)=Vf(i,:);
  k=k+1;
end

%%
%Voltaje en la celda
Vccorto=round(length(Vc)/10000); %1000
k=1;
for i=1:Vccorto:length(Vc)
  Vc1(k,:)=Vc(i,:);
  k=k+1;
end

%%
%Corriente en el arreglo
Ifcorto=round(length(If)/10000); %1000
k=1;
for i=1:Ifcorto:length(If)
  If1(k,:)=If(i,:);
  k=k+1;
end

```

Figura 29. Reducción de datos. Fuente: Autor.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

```

%%
%arreglo
If2 = smooth(Vf1,If1,0.1,'loess');
tiledlayout(2,1)
nexttile
plot(Vf1,If1,'b.',Vf1,If2,'r-')
xlabel('Voltaje (V)','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
ylabel('Corriente (A)','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
set(gca,'YLim',[0 0.13],'XLim',[2 110])
legend('Original del arreglo','Smoothed del arreglo')


---


%%
%celda
If3 = smooth(Vc1,If1,0.1,'loess');
nexttile
plot(Vc1,If1,'b.',Vc1,If3,'r-')
xlabel('Voltaje (V)','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
ylabel('Corriente (A)','FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
set(gca,'YLim',[0 0.13],'XLim',[-39 5.8])
legend('Original de la celda','Smoothed de la celda')

```

Figura 30. Smooth para las curvas. Fuente: Autor.

En la Figura 30 se muestra el código utilizado para graficar punto por punto cada curva, siendo *If2* la corriente del arreglo para graficar la curva del arreglo y *If3* la corriente del arreglo para graficar la curva de la celda.



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

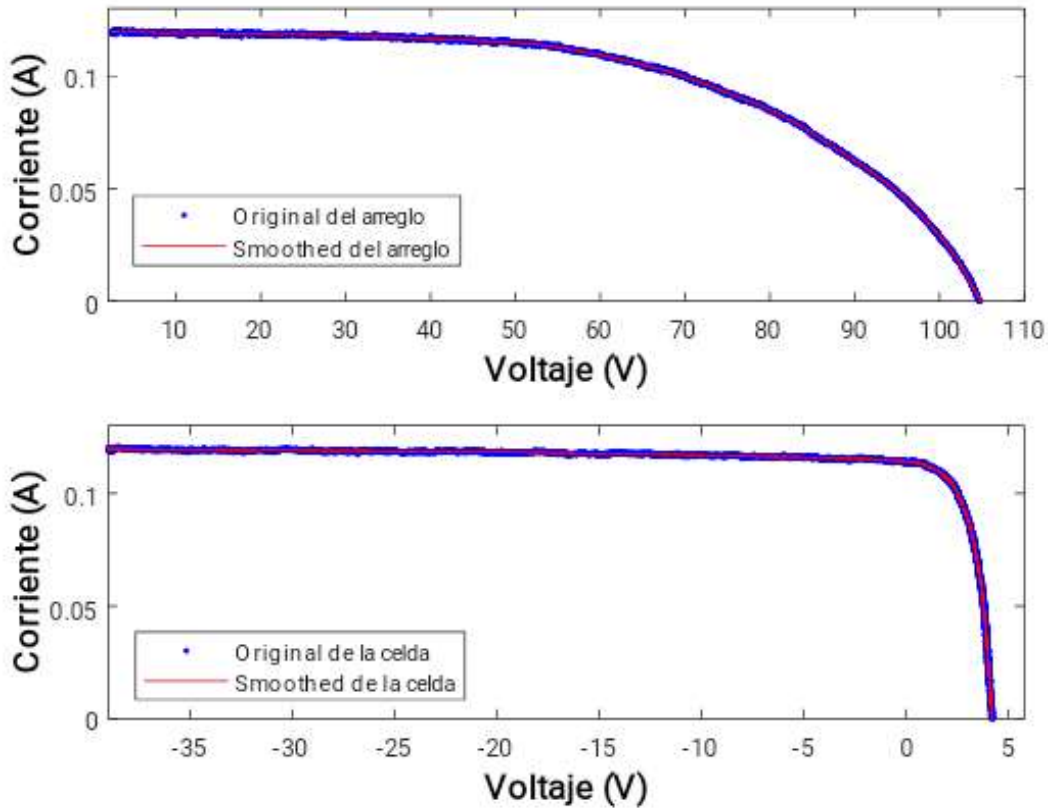


Figura 31. Curvas sin suavizar y suavizadas. Fuente: Autor.

En la Figura 31 se puede observar que las gráficas de color azul son las mismas gráficas de la Figura 27 y la Figura 28 (aplicándoles el código de la Figura 29), y las de color rojo son las gráficas suavizadas por el código de la Figura 30. Cabe resaltar que se hizo todo este procedimiento para ambas pruebas tanto como con sombra como para sin sombra. Las cuales se mostrarán en la Figura 32 y en la Figura 33 para las pruebas sin sombra y para las pruebas con sombra en la Figura 34 y en la Figura 35.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

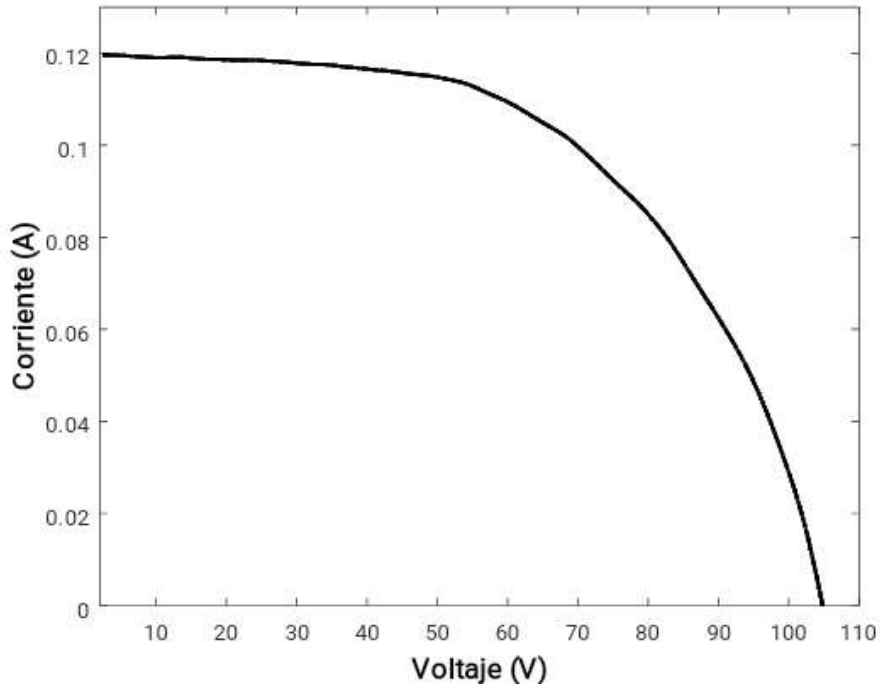
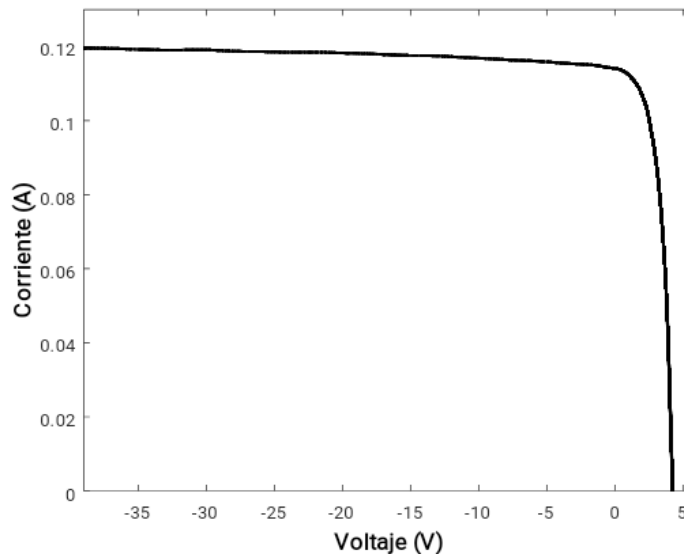


Figura 32. Curva IV del arreglo sin sombra. Fuente: Autor.

En la Figura 32 se muestra la curva IV del arreglo obtenida después de realizar todo el procedimiento dicho anteriormente, esta curva se obtuvo a una irradiación  $892 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de  $45.6C$ .



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 33. Curva IV de la celda sin sombra. Fuente: Autor.

En la Figura 33 se muestra la curva IV de la celda obtenida después de realizar todo el procedimiento dicho anteriormente, esta curva se obtuvo a una irradiación  $892 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de  $45.6C$ .

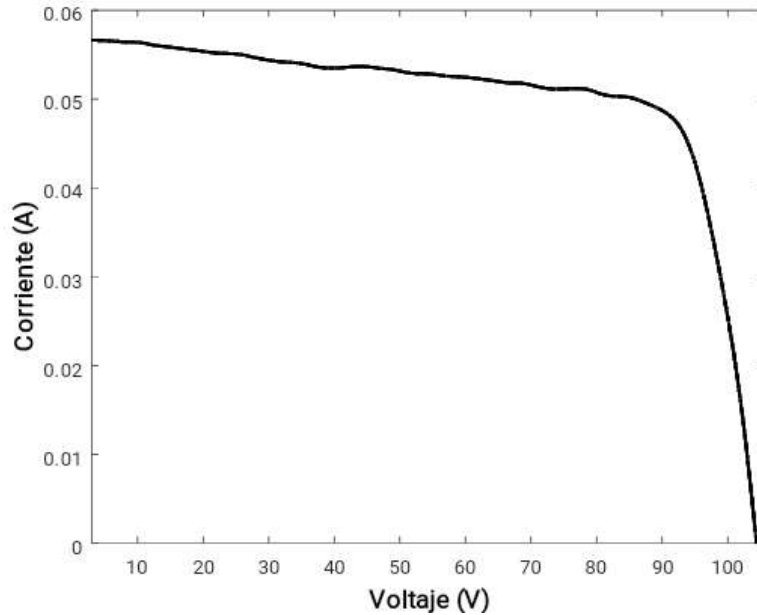


Figura 34. Curva IV del arreglo con sombra. Fuente: Autor.

En la Figura 34 se muestra la curva IV del arreglo obtenida después de realizar todo el procedimiento dicho anteriormente, esta curva se obtuvo a una irradiación  $891 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de  $46.1C$ . La sombra que se utilizó fue una esponja pequeña la cual se puede observar en la Figura 25.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>		Código	FDE 089
			Versión	04
			Fecha	24-02-2020

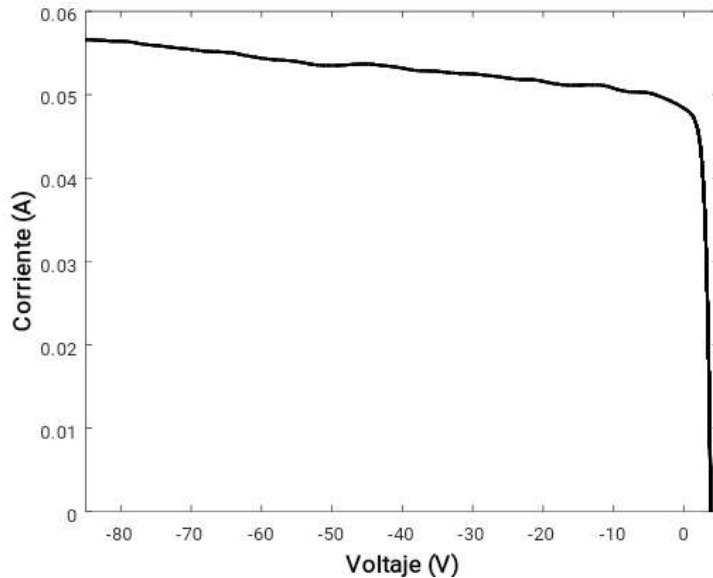


Figura 35 Curva IV de la celda con sombra. Fuente: Autor.

En la Figura 35 se muestra la curva IV de la celda obtenida después de realizar todo el procedimiento dicho anteriormente, esta curva se obtuvo a una irradiación  $891 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de  $46.1^{\circ}C$ . La sombra que se utilizó fue una esponja pequeña la cual se puede observar en la Figura 25. Después de obtener las curvas en Matlab se procedió a trabajar con la curva de la Figura 33, extrayendo de ella los cinco parámetros.

```

%Voltaje minimo y corriente minima
Vicelda=VCelda(min(j));
IiCelda=ICelda(d-1);
%Voltaje maximo y corriente maximo
VmCelda=VCelda(d-1);
ImCelda=ICelda(min(j));
f=1;
for e=min(j):1:d-1
    if (VCelda(e)>=0)
        Vcel(f,1)=VCelda(e);
        Icel(f,1)=ICelda(e);
        f=f+1;
    end
end
end

```

Figura 36. Valores mínimos y máximos del voltaje y la corriente. Fuente: Autor.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Después de tener los rangos de voltaje y corriente se procede a hallar los parámetros que representan al modelo SDM, para hacerlo se usó el procedimiento descrito en (Perich Ibáñez et al., 2020). Para hallar los parámetros primero se calculó la potencia de la celda para la como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{cell} = V_{cell} * I_{cell} \quad \text{Ecuación 10}$$

Después se calculó el valor máximo de potencia que es igual a  $P_{max}$  y en ese mismo punto se halló la  $I_{mp}$  y  $V_{mp}$ , luego se empleó la Ecuación 4 para hallar el voltaje térmico de la celda. Luego se hallaron las resistencias con las siguientes ecuaciones, para las cuales se traza una línea paralela a cada eje en la curva IV (para  $R_s$  la línea va paralela al eje Y y para  $R_{sh}$  al eje X), de esta línea se saca la pendiente y las resistencias se calculan como el inverso negativo de la pendiente:

$$R_s = - \frac{V_i - V_f}{I_i - I_f} \quad \text{Ecuación 11}$$

Siendo  $V_f$  el voltaje de circuito abierto y  $I_f$  la corriente mínima en la celda

$$R_{sh} = - \frac{V_i - V_f}{I_i - I_f} \quad \text{Ecuación 12}$$

Siendo  $V_f$  el voltaje mínimo en la celda y  $I_f$  la corriente de cortocircuito

Por otro lado se empleó la siguiente ecuación para calcular el factor de idealidad

$$A = \frac{V_{mp} + R_s * I_{mp} - V_{oc}}{V_T * \ln \ln \left( I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{sh}} - I_{mp} \right) - \ln \ln \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Como también se empleó la para hallar la corriente de saturación en el diodo la Ecuación 14 y la Ecuación 15 para calcular la corriente en el mismo

$$I_0 = \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) * e^{-\frac{V_{oc}}{A * V_T}} \quad \text{Ecuación 14}$$

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$I_D = I_0 * e^{\frac{V_{oc} + I_{sc} * R_s}{A * V_T}}$$

Ecuación 15

Después de tener todos los cálculos se halló la fotocorriente con la siguiente ecuación:

$$I_{ph} = I_{sc} * \left( 1 - \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 * \left( e^{\frac{I_{sc} * R_s}{A * V_T}} - 1 \right)$$

Ecuación 16

$R_{sh}$	$R_s$	$A$	$I_0$	$I_D$	$I_{ph}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$
448.4319Ω	8.4816Ω	18.3281	2.3528 * 10 <sup>-5</sup> A	0.7149A	0.1164A	4.2305V	0.1141A

Tabla 1. Parámetros arrojados. Fuente: Autor.

Después de haber calculado todos los parámetros, se pueden observar los resultados en la Tabla 1. Después de hallar todos los parámetros se emplearon en la simulación del modelo de un solo diodo con la herramienta Simulink como se muestra en la Figura 37.

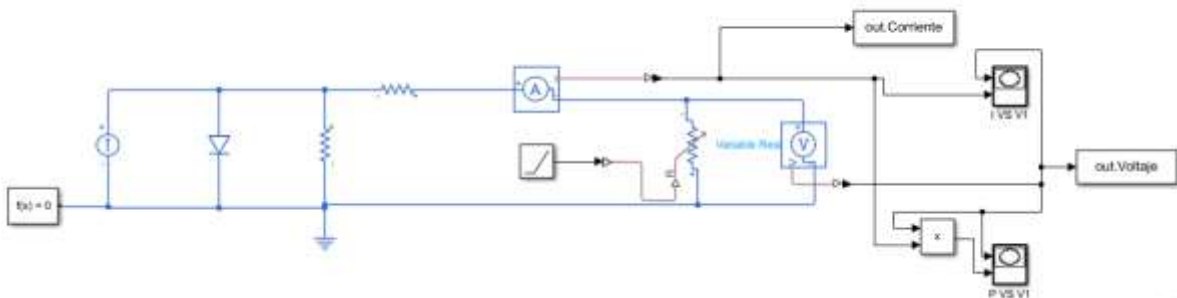


Figura 37. Esquemático del modelo de un diodo en Simulink. Fuente: Autor.

En la Figura 37 se muestra el modelo de un diodo en el cual se le impusieron los valores obtenidos en la Tabla 1 usando el proceso de estimación descritos desde la Ecuación 10 hasta la Ecuación 16, para simular y obtener la curva IV mostrada en la Figura 38 y la curva PV mostrada en la Figura 39.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

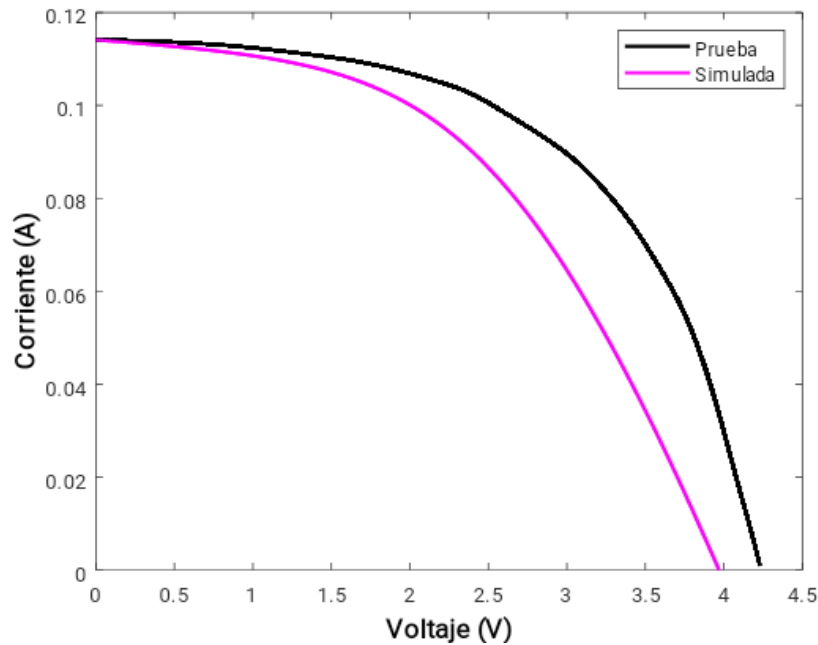


Figura 38. Curva IV comparando la original y la obtenida con el modelo SDM. Fuente: Autor.

En la Figura 38 se puede observar la curva original que es la de color negro y la curva arrojada por el modelo SDM simulado en Simulink que es la de color fucsia. Como se puede ver estas curvas tienen aproximadamente el mismo valor para la corriente de cortocircuito, como también que el voltaje de circuito abierto es diferente, esto puede haber sucedido por que el factor de idealidad del diodo es muy alto, porque la resistencia  $R_s$  también lo es o por el Simulador que se utilizó puede presentar unas pequeñas variaciones. Pero a pesar de estas diferencias las curvas tienen el mismo comportamiento.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

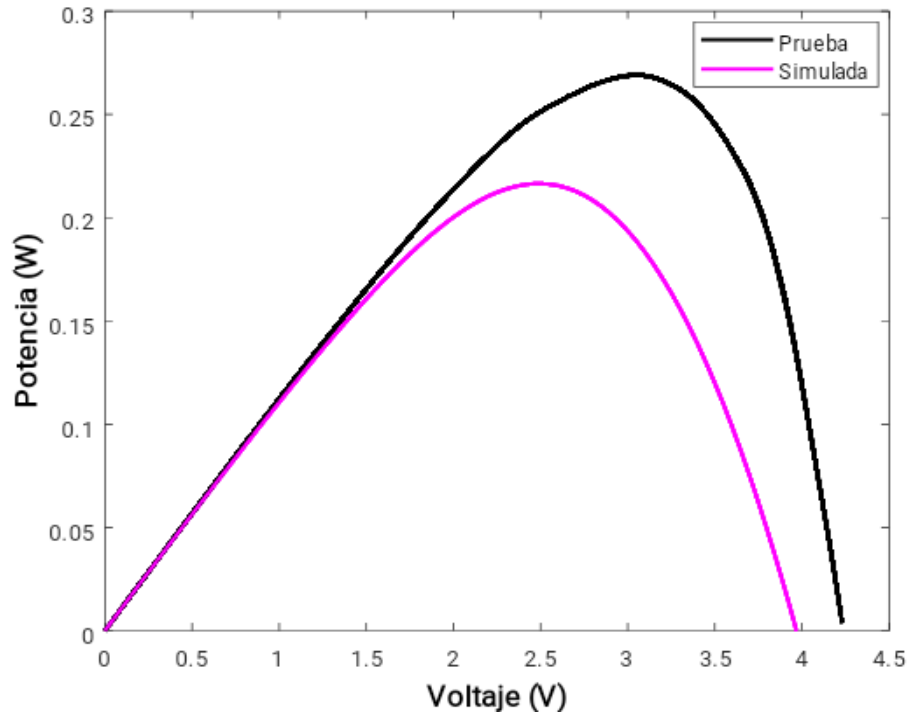


Figura 39. Curva PV comparando la original y la obtenida con el modelo SDM. Fuente: Autor.

En la Figura 39 se puede observar la curva original que es la de color negro y la curva arrojada por Simulink que es la de color fucsia. Como se ve el voltaje de circuito abierto son diferentes como lo es la máxima potencia. Después de graficar las curvas con el modelo de un diodo se procedió hacer lo mismo con el modelo de Bishop, donde se utilizó el circuito de la Figura 40 para simular en Simulink. En la que se presentaran los valores utilizados en este modelo en la Tabla 2, en la Figura 41 y en la Figura 42 se mostraran las curvas obtenidas.

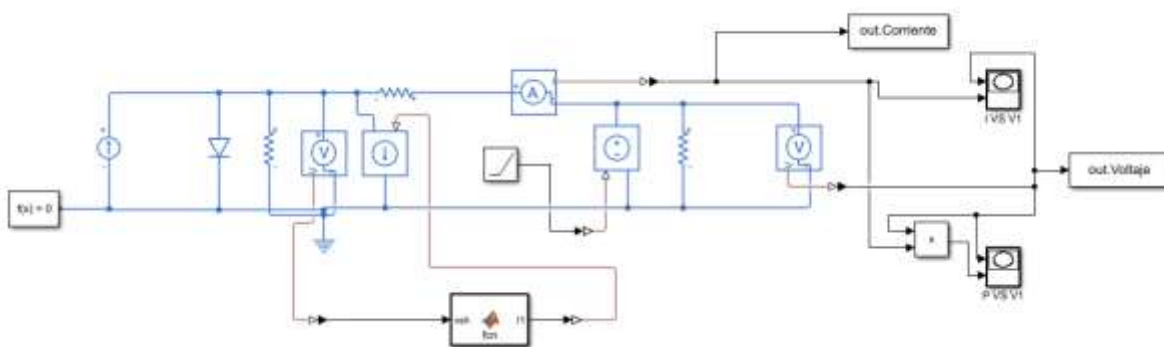


Figura 40. Esquemático del modelo de Bishop en Simulink. Fuente: Autor.



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la Figura 40 se muestra el modelo del modelo de Bishop en la herramienta Simulink en donde fcn contiene a  $m$ ,  $V_{br}$  y  $a$ , y el cálculo de la componente adicional de corriente propuesta por Bishop.

$R_{sh}$	$R_s$	$A$	$I_0$	$ID$	$I_{ph}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$
448.4319 $\Omega$	8.4816 $\Omega$	18.3281	$2.3528 * 10^{-5}A$	0.7149A	0.1164A	4.2305V	0.1141A
<b>Bishop</b>							
$a$			$V_{br}$			$m$	
0.002			-200			3	

Tabla 2. Parámetros arrojados. Fuente: Autor.

En la Tabla 2 se puede observar que se utilizaron los mismos valores que se usaron el modelo de un diodo y que se le agregaron los valores de Bishop.

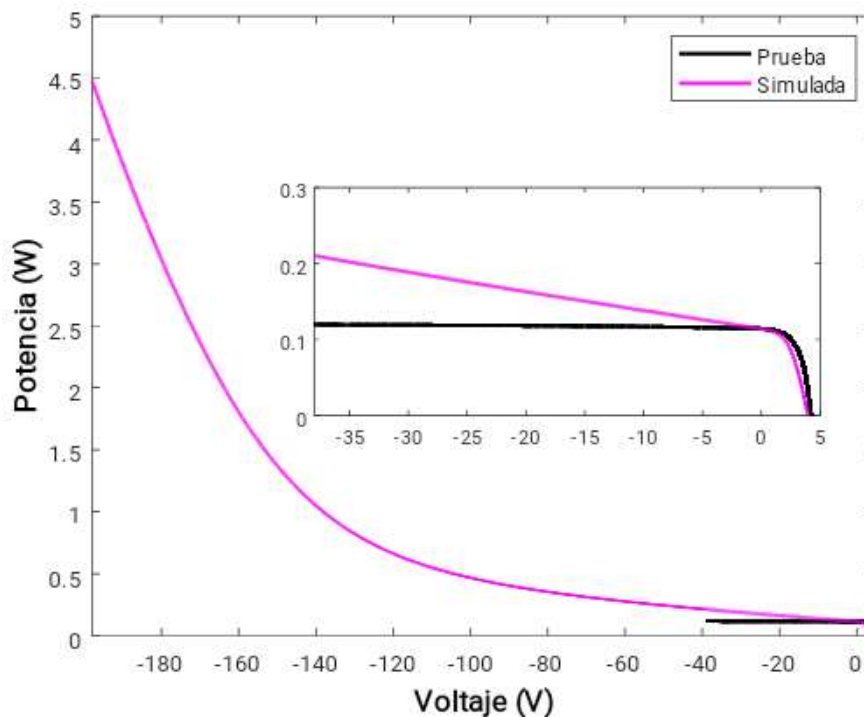


Figura 41. Comparación de Curva IV original y el modelo de Bishop. Fuente: Autor.

En la Figura 41 se puede observar la curva de los datos experimentales es la de color negro y la curva simulada que es la de color fucsia. Como se puede observar la prueba realizada no fue suficiente para identificar el voltaje de ruptura de la celda. Es posible que se haya requerido de un número mayor de celdas conectadas en serie. Sin embargo, la capacidad de voltaje de la carga electrónica solo permite un máximo de 120V.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

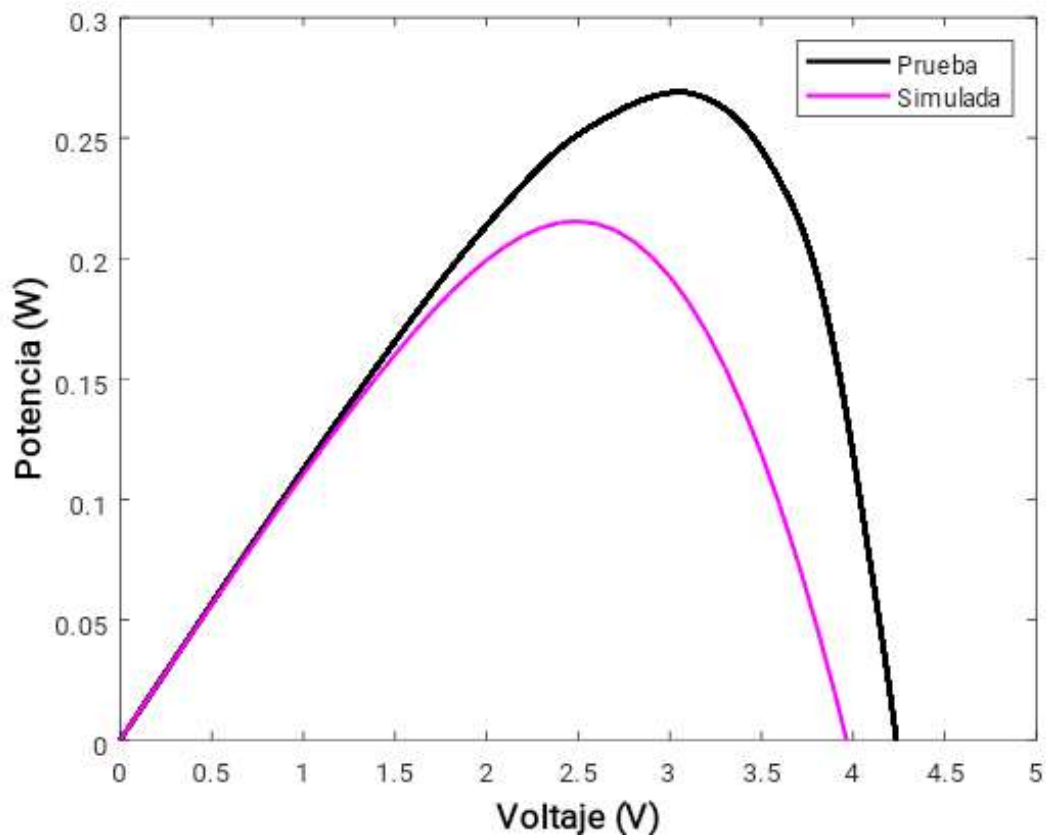


Figura 42. Comparación de Curva PV original y el modelo de Bishop. Fuente: Autor.

En la Figura 42 se puede observar la curva experimental es la de color negro y la curva simulada es la de color fucsia y que estas curvas tienen el mismo comportamiento de la Figura 39.

$a$	$V_{br}$	$m$
0.001	-500	2

Tabla 3. Parámetros arrojados. Fuente: Autor.

En la Tabla 3 se puede observar que se utilizaron los mismos valores que se usaron el modelo de un diodo y que se le agregaron los valores de Bishop.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

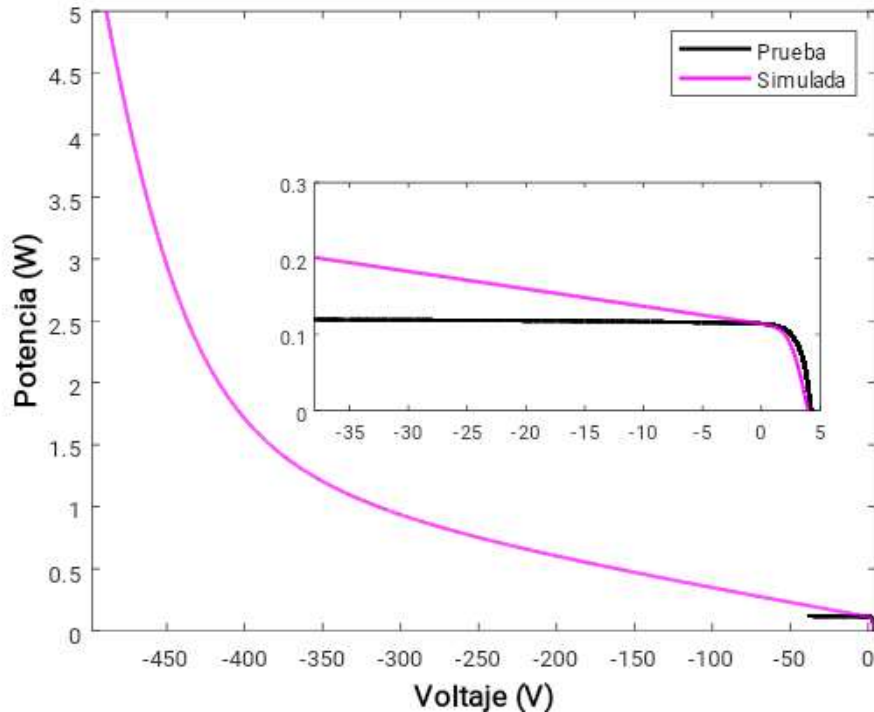


Figura 43. Comparación de Curva IV original y el modelo de Bishop. Fuente: Autor.

En la Figura 43 se puede observar la curva de los datos experimentales es la de color negro y la curva simulada que es la de color fucsia. Al comparar las curvas de la Figura 41 y la Figura 43 se puede notar en el zoom que entre más pequeños sean  $a$  y  $m$  la curva se aplana más. Al observar la Figura 41 Figura 43 se puede ver que los resultados de las simulaciones no se ajustan correctamente a los resultados de las pruebas, por lo tanto se recomienda hacer una estimación de los parámetros del modelo de Bishop y de los ocho parámetros de forma conjunta (estimación del primer y segundo cuadrante juntos), y además se recomienda realizar una búsqueda del rango en donde puede variar cada uno de los parámetros, según el tipo de celda, el tamaño, lo potencia que entrega y la tecnología.

Después de graficar las curvas con el modelo de un diodo y de Bishop se procedió hacer lo mismo con el modelo de anti-paralelo, donde se utilizó el circuito de la Figura 19 para simular en Simulink. En la que se presentaran los valores utilizados en este modelo en la Tabla 4, en la Figura 41 y en la Figura 42 se mostrarán las curvas obtenidas.

$A$	$I_0$	$ID$	$I_{ph}$	$V_{oc}$	$I_{sc}$
18.3281	$2.3528 * 10^{-5}A$	0.7149A	0.1164A	4.2305V	0.1141A
<b>Anti-paralelo</b>					
$A_{inv}$		$I_{0inv}$			$V$

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

---

1.5	$1 * 10^{-10} A$	-200V
-----	------------------	-------

---

Tabla 4. Parámetros arrojados. Fuente: Autor.

En la Tabla 4 se puede observar que se utilizaron los mismos valores que se usaron el modelo de un diodo y que se le agregaron los valores de Bishop.

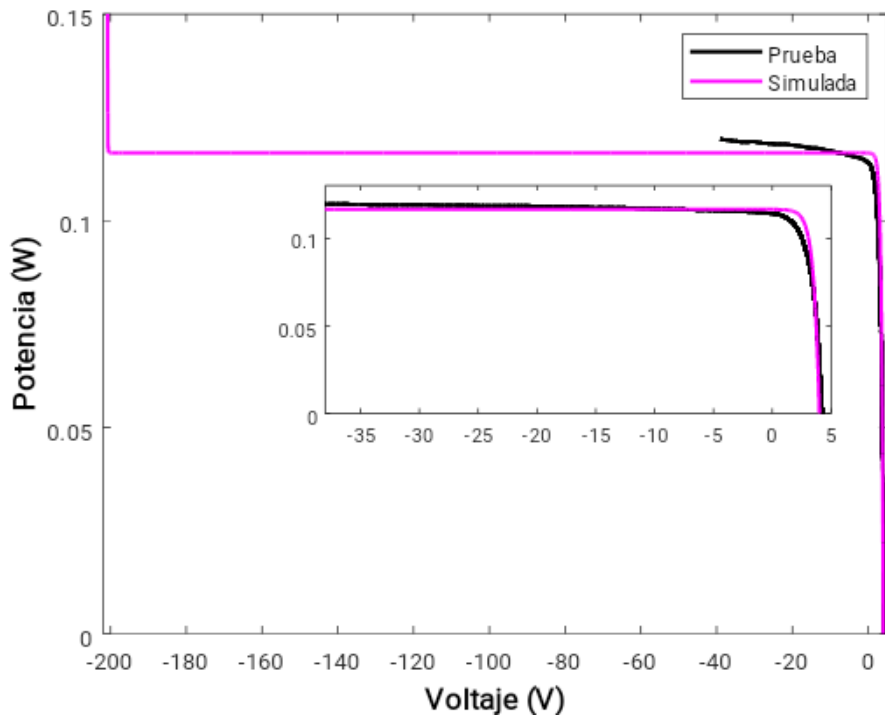


Figura 44. Curva IV comparando los datos experimentales y el modelo anti-paralelo.  
Fuente: Autor.

En la Figura 45 se puede observar la curva de los datos experimentales es la de color negro y la curva simulada que es la de color fucsia. Se debe tener claro que este modelo tiene este comportamiento, ya que le falta el compromiso de las resistencias y como es una forma ideal de representación no se puede esperar que se tenga una respuesta certera, sin embargo es un muy buen punto de partida llegado el caso que se quiera realizar una simulación simple porque a diferencia del modelo SDM este si muestra el voltaje de ruptura y tiene menos parámetros para ajustar.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

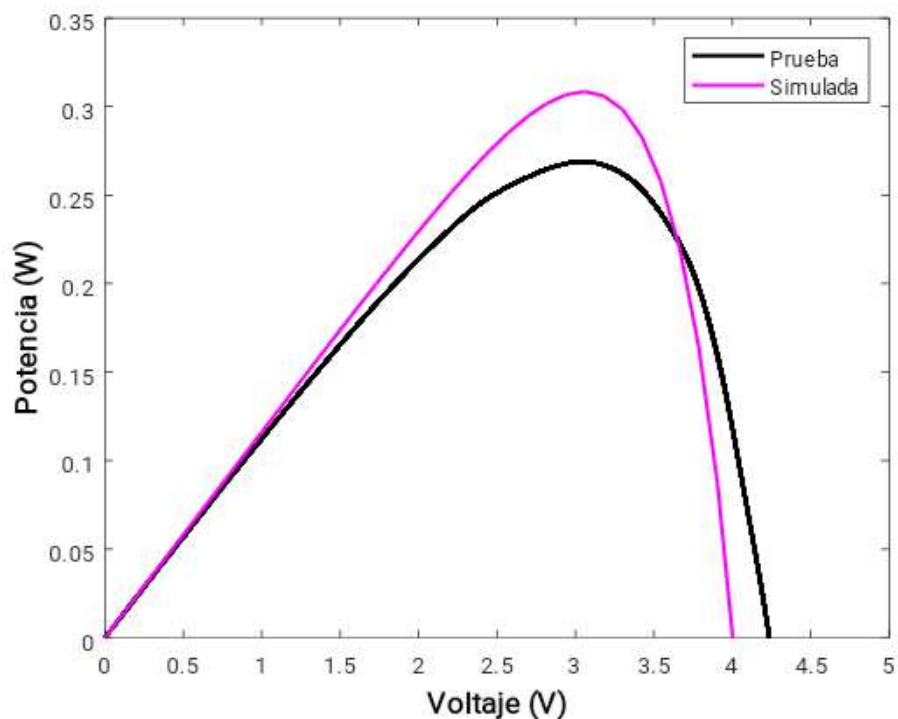


Figura 46. Curva PV comparando los datos experimentales y el modelo anti-paralelo  
Fuente: Autor.

En la Figura 46 se puede observar la curva experimental es la de color negro y la curva simulada es la de color fucsia, se puede notar que la curva simulada tiene una potencia máxima mayor a la de la curva experimental.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

### 5.1 Conclusiones

- Todos los modelos estudiados trabajan de forma similar en el primer cuadrante.
- El modelo de dos diodos es más recomendable de usar si se quiere tener una mejor precisión al momento de obtener la curva en el primer cuadrante.
- Tanto el modelo de un diodo, como el de dos diodos y el de Bishop se pueden analizar desde su modelo matemático y también desde su representación circuital, pero se recomienda la forma circuital ya que es menos compleja de entender y es más directa a la hora de obtener resultados.
- El modelo de Bishop presentó muy buenos resultados al momento de simular y al variar los factores que afectan el segundo cuadrante, como también al ser comparado con el funcionamiento del modelo de un diodo ya que trabajan de forma idéntica en el primer cuadrante.
- El modelo anti-paralelo no trabaja de forma idéntica al modelo de un diodo ya que no tiene las resistencias que son las encargadas de representar las fugas e impurezas que presenta la celda.
- Los datos tomados de forma práctica presentaron muy buenos resultados al momento de realizar la curva IV y la curva PV tanto para el arreglo como para la celda.
- Las curvas tomadas con el modelo de un diodo de forma simulada arrojaros muy buenos resultados con respecto a la curva tomadas de forma práctica ya que esta curva trabajo como se debía.
- Las curvas tomadas con el modelo de Bishop y el modelo Anti-paralelo de arrojaron resultado buenos, sin embargo es de vital importancia realizar la estimación de los parámetros de cada modelo en conjunto y hacer una validación con los datos experimentales.
- Se debe identificar cual es el comportamiento de la celda ya que esta depende mucho del tiempo de uso que tenga la celda, de que si ha presentado problemas o se ha observado afectaciones en el aspecto físico y también si posee problemas desde la

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

fábrica. Ya que esto es de suma importancia para realizar este análisis experimental para tener un monitoreo de la celda.

- En la comparación de las curvas con los tres modelos, el voltaje Voc y la potencia no llegaron al punto esperado, Pero que a pesar de estas diferencias las curvas tienen el mismo comportamiento. Pudo haber sucedido por que el factor de idealidad del diodo es muy alto, porque la resistencia  $R_s$  también lo es o por el Simulador que se utilizó puede presentar unas pequeñas variaciones.

### 5.2 Recomendaciones

- Al momento de implementar el modelo de un diodo, el modelo de dos diodos y el modelo de Bishop se recomienda que se cumpla la condición que indica que la resistencia  $R_{sh}$  debe ser más grande que la resistencia  $R_s$ , pues de no hacerlo se obtienen resultados no deseados.
- Se recomienda que cuando se esté simulando el modelo anti-paralelo el valor de la *Rampa* sea mayor que el valor de la fuente de voltaje  $V$  que representa en voltaje de ruptura ya que este es sumado con el voltaje del diodo  $V_{d_{inv}}$  y este será el voltaje de ruptura.

### 5.3 Trabajo futuro

- Se desea trabajar en el conjunto de ecuaciones que representen el modelo anti-paralelo que fue presentado en este trabajo.
- Se desea trabajar en la estimación de parámetros de cada modelo usando técnicas de optimización.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## REFERENCIAS

---

- Alonso Lorenzo, J. A. (n.d.). *Efecto de las sombras en un panel solar fotovoltaico*. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/efecto-de-las-sombras-en-un-panel-solar-fotovoltaico/>
- Andrianajaina, T., Sambatra, E. J. R., Andrianirina, C. B., Razafimahefa, T. D., & Heraud, N. (2016). PV fault detection using the least squares method. *Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016, Epe*, 846–851. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781456>
- Belhadj, C. A., Banat, I. H., & Deriche, M. (2017). *A detailed analysis of photovoltaic panel hot spot phenomena based on the bishop model*. 222–227.
- Christina, H., & Stuart, B. (n.d.-a). *Factor de idealidad*. Retrieved May 1, 2021, from <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operación-de-célula-solar/factor-de-idealidad>
- Christina, H., & Stuart, B. (n.d.-b). *Resistencia en serie*. Retrieved April 10, 2021, from <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operación-de-célula-solar/resistencia-en-serie>
- Christina, H., & Stuart, B. (n.d.-c). *Resistencia shunt*. Retrieved April 9, 2021, from <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operación-de-célula-solar/resistencia-shunt>
- Fezzani, A., Mahammed, I. H., & Said, S. (2014). Matlab-based modeling of shading effects in photovoltaic arrays. *STA 2014 - 15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering*, 781–787. <https://doi.org/10.1109/STA.2014.7086686>
- Flores, N., & Domínguez, M. (2017). *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio*. Centro de Investigación En Materiales Avanzados, S.C. Posgrados. [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/215/1/Tesis\\_MER\\_Norma\\_Rosario\\_Flores\\_Rivera\\_y\\_Mioguel\\_Ángel\\_Dominguez\\_Ramírez.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/215/1/Tesis_MER_Norma_Rosario_Flores_Rivera_y_Mioguel_Ángel_Dominguez_Ramírez.pdf)
- García Barrientos, A. (2016). *Fuentes de Energías Alternas : Teoría y Práctica* (A. García Barrientos, O. Pozos Ávila, & J. Castillo Plaza (eds.); Issue August 2014).
- Gimeno Sales, F. J., Orts Grau, S., & Salvador Seguí, C. (2014). Módulos fotovoltaicos. In *Energía Solar Fotovoltaica – Una Apuesta De Futuro Sostenible*. (p. 56). [https://www.cursofotovoltaica.com/wp-content/uploads/2017/07/WEB\\_FV\\_Intro\\_FIP\\_Cap02\\_Trina\\_Modulos\\_sp\\_140525.pdf](https://www.cursofotovoltaica.com/wp-content/uploads/2017/07/WEB_FV_Intro_FIP_Cap02_Trina_Modulos_sp_140525.pdf)
- Hadj Mahammed, I., Hadj Arab, A., Berrah, S., Bakelli, Y., Khennene, M., Oudjana, S. H., Fezzani, A., & Zaghba, L. (2017). Outdoor study of partial shading effects on different PV modules



	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

technologies. *Energy Procedia*, 141, 81–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.016>

Herrera Salcedo, R. (2013). *Modelado y caracterización de paneles fotovoltaicos*.

Jiménez, J. R. (2017). *Módulos fotovoltaicos*. [https://www.iluminet.com/modulos-fotovoltaicos-hoja-datos-solar/#:~:text=El «factor de relleno»%2C,producto de Voc e Isc](https://www.iluminet.com/modulos-fotovoltaicos-hoja-datos-solar/#:~:text=El%20factor%20de%20relleno,producto%20de%20Voc%20e%20Isc).

Koffi, H. A., Kuditcher, A., Kakane, V. C. K., Armah, E. A., Yankson, A. A., & Amuzu, J. K. A. (2015). The Shockley five-parameter model of a solar cell: A short note. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 7(6), 491–494. <https://doi.org/10.1080/20421338.2015.1038007>

Mineros Alvarado, J. J. (2017). *Propuesta para normar proyectos de autoconsumo de generación fotovoltaica para generación distribuida*. [http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/1386/1/63430\\_tesis.pdf](http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/1386/1/63430_tesis.pdf)

Orozco Gutierrez, M. L., Ramirez Scarpetta, J. M., Spagnuolo, G., & Ramos Paja, C. A. (2014). A method for simulating large PV arrays that include reverse biased cells. *Applied Energy*, 123, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.052>

Ortiz Núñez, G., Robles Algarín, C., Pérez Tobón, J., Ospino Castro, A., & Martínez Lengua, A. (2020). *Evaluación del desempeño de los modelos de un diodo y dos diodos para módulos fotovoltaicos*. 41(36), 152–170.

Perich Ibáñez, R., Sevillano Bendezú, M., Montes Romero, J., Conde Mendoza, L., Angulo Abanto, J., De la Casa Higuera, J., & Palomino Töfflinge, J. (2020). *Estudio de los métodos analíticos para la extracción de parámetros eléctricos de módulos fotovoltaicos de capas delgadas*. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2309-04132020000100053&script=sci\\_arttext#B4](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2309-04132020000100053&script=sci_arttext#B4)

Rodriguez, E. (n.d.). *Paneles solares*. Retrieved July 15, 2021, from <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

Salamanca Céspedes, J. E. (2012). *Celdas fotovoltaicas de alta eficiencia y sistema de paneles solares del cubesat colombia 1*. 2012. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/6381/7901>

Wen, Z., Chen, J., Cheng, X., Niu, H., & Luo, X. (2019). A new and simple split series strings approach for adding bypass diodes in shingled cells modules to reduce shading loss. *Solar Energy*, 184(December 2018), 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.099>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES	<i>Alejandra Ortiz Pasos</i>
FIRMA ASESORES	<i>Mariana D.F</i>
	<i>DAVID J. RESTREPO C</i>
	FECHA ENTREGA: <u>29/11/2021</u>