

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE  
LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN ARREGLO FOTOVOLTAICO EN  
CONFIGURACIÓN SERIE PARALELO OPERANDO BAJO CONDICIONES DE  
SOMBRADOS PARCIALES.**

**MÓNICA LILIANA BARRERA CÉSPEDES  
MARÍA FERNANDA RÍOS CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE  
LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN ARREGLO FOTOVOLTAICO EN  
CONFIGURACIÓN SERIE PARALELO OPERANDO BAJO CONDICIONES DE  
SOMBRADOS PARCIALES.**

**MÓNICA LILIANA BARRERA CÉSPEDES  
MARÍA FERNANDA RÍOS CÁRDENAS**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director**

**JUAN DAVID BASTIDAS RODRIGUEZ  
Ph.D. en Ingeniería**

**Codirector**

**FRANKLIN ALEXANDER SEPULVEDA  
Ph.D. en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*Primeramente, a Dios por escuchar mis oraciones, por darme la fortaleza, sabiduría y entendimiento durante este proceso.*

*Cierro mis ojos recordando todo lo que viví durante este ciclo y te veo a ti, dándome la mano, apoyándome en todo sentido y guerreando conmigo, aunque fuese de lejos, frente a todos los obstáculos que se presentaron. Te debo lo que soy ahora, te debo mi vida y mis triunfos. A ti Alicia Céspedes por ser mi madre, por ser mi todo y por creer en mí, te dedico este y todos mis logros.*

*A mi padre Pedro Barrera por acompañar a mi madre y a mi durante todo este camino, por sus sabias palabras y por la paciencia brindada.*

*A mis hermanos William Vargas y Cesar Céspedes, a mi cuñada Johana Silva y a mi hermosa sobrina Valentina Vargas por ser mi motivo de mi alegría, por desearme siempre el bien y por sus buenos consejos.*

*A David Ortega por acompañarme en esta última etapa, por animarme cada día gris que tuve, por cuidarme, ayudarme y por creer que todo esto sería posible. Gracias por llegar en el momento justo, cuando más te necesitaba, gracias por iluminar mi vida David y por amarme como lo haces.*

*A Paula Camila Fernández por ser mi mejor amiga, mi apoyo constante y por seguir ahí después de que todo ya paso.*

*A Marlon Espinosa por acompañarme durante muchos años de mi carrera estando en cada fracaso y en cada triunfo, por tenerme paciencia y por ayudarme como lo hizo.*

*Por último, a mi familia Céspedes cabanzo y a mis amigos más cercanos de la escuela E3T.*

**Mónica Liliana**

## DEDICATORIA

*A ti padre Misericordioso te ofrezco tan anhelado triunfo, por la darme la dicha, la oportunidad de poder compartir la alegría de este logro con la mejor persona que me has podido dar en la vida, esa mujer luchadora, perseverante, berraca, echada para adelante, la mejor de todas tú mi vida hermosa María Amparo Cárdenas R, gracias mamita mil y mil gracias por estar a mi lado, por nunca desistir para alcanzar ese sueño, nuestro sueño. A ti papito Marco Antonio Ríos, porque sin importar nuestras diferencias, siempre luchaste desde principio a fin sin perder nunca la ilusión y la confianza que colocaste en mí, gracias pa ya soy tu ingeniera.*

*A mis hermanos Mony, Dany, Sandy y Jhon, gracias por el apoyo incondicional, por esas palabras hermosas de ánimo, de orgullo, los amo manitos. A ti abuelita gracias por sus oraciones Diosito y la Santísima Virgen nos escuchó, lo logramos Lilia Rodríguez de Cárdenas.*

*A ti princesa Cindy Lorena López Rodríguez, sé que llegaste cuando más lo necesitaba, llegaste para transformar mi mundo y mira los resultados, gracias por tu constante lucha y apoyo, por tu amor verdadero, te amo.*

*A mí por demostrarme que, si se puede, que querer es poder, porque a la final no importa cuántas veces caigas, lo importante es que nunca dejes de persistir.*

*Y a todos aquellos que, con sus buenas intenciones, sus bonitas oraciones aportaron sus buenas energías para lograr este sueño.*

**María Fernanda**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Cada paso que di durante este proceso fue importante para construir mi sueño, sabiendo que sin el apoyo de personas llenas de conocimiento no llegaría a ser ingeniera electrónica de la UIS. Por tal motivo, agradezco a cada uno de los profesores de la escuela E3T que con gran paciencia se dedican a compartir su sabiduría acompañando al estudiante por el camino educativo.*

*Agradezco al profesor Juan David Bastidas por guiarme durante la tesis de grado y creer siempre en nosotras, por hacer que esto fuese posible y por enseñarme el valor de la dedicación para así lograr lo que me propongo.*

*Doy gracias a mi amiga y compañera de tesis María Fernanda Ríos por trabajar siempre en grupo, teniendo paciencia y dedicación durante este proceso, ahora si lo logramos.*

*A todos les quedo infinitamente agradecida.*

*Monica Liliana*

*A mi protector porque su misericordia es infinita, gracias Dios mío por nunca dejarme decaer.*

*A ese ser tan integro el Ph.D. Juan David Bastidas, que siempre lucho porque este proyecto saliera adelante, con su paciencia, su empeño, su manera de hacer ver diferente las cosas, por todas sus enseñanzas, gracias profe.*

*A mi amiga y compañera Mónica Liliana Barrera, gracias china porque en realidad fue un buen equipo de trabajo, por su constancia y su interés, por todo el tiempo que luchamos para superar los obstáculos y al final lo logramos Moni, ya somos ingenieras.*

*A la universidad porque no ha pasado un solo día que no agradezca a Dios por darme la oportunidad de ser UIS, en realidad es un orgullo. A la E3t por ese excelente grupo de trabajo que logran aportar su granito de arena para hacer parte de cada logro que se quiera alcanzar.*

*A todos mil gracias.*

**María Fernanda**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO .....	19
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.3. ALCANCE .....	20
2. MODELO MATEMÁTICO.....	22
3. INSTALACIÓN DE PYTHON Y LAS LIBRERÍAS NECESARIAS .....	33
3.1. DEFINICIÓN DE PYTHON .....	33
3.2. INSTALACION DE LIBRERIAS .....	33
3.3. INSTALACION DE PYTHON .....	35
4. INTERFAZ GRÁFICA .....	36
4.1. VENTANA 1: PRESENTACIÓN E INFORMACIÓN.....	38
4.2. VENTANA 2: PARÁMETROS.....	40
4.3. VENTANA 3: GRÁFICAS.....	43
5. RESULTADOS.....	46
6. CONCLUSIONES .....	58
7. RECOMENDACIONES.....	59
CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de los pasos del proyecto. ....	17
Figura 2. Vista transversal de una celda solar fotovoltaica [5]. ....	22
Figura 3. Modelo circuital simplificado de una celda solar. ....	23
Figura 4. Modelo de diodo simple de un módulo PV.....	24
Figura 5. Celdas PV conectas en serie y diodo de protección en anti paralelo (Módulo PV).....	24
Figura 6. Modelo de un arreglo fotovoltaico en configuración serie paralelo. ....	29
Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto en [1] .....	30
Figura 8. Diagrama de interacción entre las ventanas.....	36
Figura 9. Diagrama de flujo de funcionamiento de las ventanas. ....	37
Figura 10. Cargando software PVACC .....	38
Figura 11. Ventana de presentación e información (Ventana N°1).....	39
Figura 12. Ventana de “Acerca de CCPV” .....	40
Figura 13. Ventana de parámetros (Ventana N°2).....	41
Figura 14. Ventana gráfica (Ventana N°3).....	44
Figura 15. Modelo de diodo simple junto con un diodo de derivación en anti paralelo de uno de los módulos del modelo circuital implementado en Simulink. ....	46
Figura 16. Modelo circuital implementado en Simulink para un arreglo PV de tamaño 4X1.....	47
Figura 17. Características eléctricas y parámetros del modulo PV.....	48
Figura 18. Matriz bajo condiciones de sombreado parcial del arreglo fotovoltaico en prueba.....	49
Figura 19. Curva característica Corriente / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 4X1.....	50

Figura 20. Curva característica potencia / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 4X1.....51

Figura 21. Modelo circuital implementado en Simulink para un arreglo de tamaño 10X2.....53

Figura 22. Matriz bajo condiciones de sombreado parcial del arreglo fotovoltaico en prueba.....54

Figura 23. Curva característica Corriente / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 10X2.....55

Figura 24. Curva característica Potencia / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 10X2.....56

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Parámetros del diodo de Bypass/Bloqueo $T=125$ [°C] .....	28

## RESUMEN

**TÍTULO:** DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN ARREGLO FOTOVOLTAICO EN CONFIGURACIÓN SERIE PARALELO OPERANDO BAJO CONDICIONES DE SOMBREADOS PARCIALES\*

**AUTORES:** MÓNICA LILIANA BARRERA CÉSPEDES  
MARÍA FERNANDA RÍOS CÁRDENAS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Paneles, Celdas, Arreglos fotovoltaicos, Software, Python.

### DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado presenta el desarrollo de una herramienta software para el cálculo de las curvas características de un arreglo fotovoltaico en configuración serie-paralelo operando bajo condiciones de sombreados parciales. Se utilizó el artículo propuesto en J.D. Bastidas a, \*, E. Francoa, G. Petrone b, C.A. Ramos-Pajac, G. Spagnuolo "A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed", 2012, como referencia para implementar el modelo de los arreglos fotovoltaicos en configuración serie-paralelo.

Dicho modelo se implementó en el lenguaje de programación Python usando librerías tales como Numpy, Math e Inspect, seguido de esto para poder hacer el modelo asequible a diferentes usuarios se desarrolló una interfaz gráfica en Python utilizando las librerías Tkinter y Matplotlib. Esta interfaz permite ingresar los datos de las características eléctricas del panel que se va a trabajar, calcular los parámetros del módulo fotovoltaico y finalmente permite ingresar las condiciones de operación del arreglo fotovoltaico para que así la herramienta calcule las curvas características Corriente/Tensión y Potencia/ Tensión bajo condiciones de sombreado parcial.

Al final se hizo una validación de los resultados obtenidos por la herramienta comparándolos con modelos circuitales de arreglos fotovoltaicos implementados en Simulink.

En este documento se encuentra una descripción que le permite al lector seguir paso a paso el proceso que fue necesario realizar para cumplir el objetivo principal y los objetivos específicos de este trabajo de grado.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Dr. Juan David Bastidas Rodríguez. Codirector Dr. Franklin Alexander Sepúlveda S.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR THE CALCULATION OF CHARACTERISTICS CURVES OF A PHOTOVOLTAIC ARRANGEMENT IN PARALLEL SERIES CONFIGURATION OPERATING UNDER PARTIAL SHADOW CONDITIONS\*

**AUTHORS:** MONICA LILIANA BARRERA CESPEDES  
MARÍA FERNANDA RÍOS CÁRDENAS\*\*

**KEY WORDS:** Panels, Cells, Photovoltaic Arrays, Software, Python

### DESCRIPTION

This work presents the development of a software tool for the calculation of the characteristic curves of a photovoltaic array in series-parallel configuration operating under partial shading conditions. It was used the article proposed in J.D. Bastidas a, \*,E. Franco, G.Petrone b, C.A. Ramos-Pajac, G. Spagnuolo "A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed", 2012, As a reference to implement the model of photovoltaic arrays in serial-parallel configuration.

This model was implemented in the Python programming language using libraries such as Numpy, Math e Inspect, followed by this to be able to make the model accessible to different users, a graphical interface was developed in Python using the libraries Tkinter and Matplotlib. This interface allows to enter the data of the electrical characteristics of the panel to be worked, to calculate the parameters of the photovoltaic module and finally allows to enter the operating conditions of the photovoltaic arrangement so that the tool calculates the characteristic curves Current/Voltage and Power/ voltage under partial shading conditions.

In the end, a validation of the results obtained by the tool was made comparing them with circuit models of photovoltaic arrangements implemented in Simulink.

In this document a reader can find a description that allows following step by step the process that was necessary to fulfill the main objective and the specific objectives of this degree work.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Scholl of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Dr Juan David Bastidas Rodríguez. Codirector Franklin Alexander Sepúlveda.

## INTRODUCCIÓN

Con el fin de disminuir la excesiva dependencia que ha tenido el mundo con el uso de fuentes convencionales de energía, debido a su impacto ambiental negativo, su creciente precio [1] y la creciente demanda de energía mundial, se ha dado a la búsqueda de nuevas fuentes alternativas para la generación de energía, dando lugar a nuevas tendencias energéticas como lo son las fuentes de energía renovables (RES por sus siglas en inglés) [1]. Para algunos países de Latino América como es el caso de Ecuador, Argentina, Honduras y Nicaragua, la energía fotovoltaica (PV) ha sido una de las soluciones con mayor prioridad en dicha problemática [2], por su bajo costo en comparación con otras fuentes sustitutivas, fortaleciendo la demanda energética que devengan. En el caso de Colombia el gobierno ha mostrado su interés en las energías renovables creando algunas leyes y resoluciones (Ley 1715 de 2014, Resolución 0186 de 2012, Ley 697 de 2001) para promover su uso en el país, por lo cual se espera que el uso de energías renovables en Colombia crezca en los próximos años.

Dentro de las energías renovables, los sistemas fotovoltaicos (PV por sus siglas en inglés) son una de las fuentes más importantes por sus ventajas como la modularidad, la disponibilidad del recurso, el poco requerimiento de mantenimiento, no necesita partes móviles, entre otras. Sin embargo, los sistemas PV presentan algunas desventajas, pues la eficiencia de transformación de energía de los paneles es relativamente baja (alrededor de 17.89% en los módulos [2]), que sometidos bajo condiciones de sombreados parciales reduce considerablemente la eficiencia global del sistema PV.

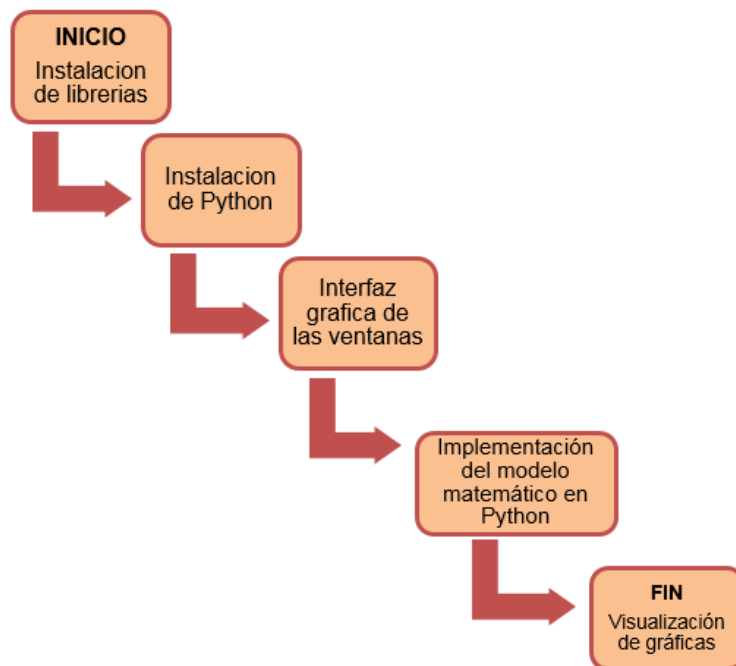
Los arreglos PV que se encuentran expuestos bajo condiciones irregulares debido a objetos presentes en la periferia (polvo, árboles, edificios, tejados, etc.), presentan

caídas en la potencia eléctrica producida, generando más de un punto de máxima potencia en la curva de potencia / tensión, limitando el funcionamiento óptimo del sistema fotovoltaico [1]. Por lo tanto, se necesitan modelos rápidos y precisos para arreglos PV operando bajo condiciones irregulares, para diferentes aplicaciones como el dimensionamiento de instalaciones PV, el desarrollo de técnicas de control, la estimación de la producción energética, entre otras [3]

Este trabajo busca desarrollar una herramienta software para el cálculo de las curvas características de un arreglo fotovoltaico, en configuración serie paralelo (SP por sus siglas en inglés) operando bajo condiciones de sombreado parcial, con el fin de facilitar el acceso al modelo propuesto en [1] a diferentes tipos de usuarios.

En la figura 1 se presenta un esquema que permitirá seguir paso a paso cada escenario del proceso realizado para el desarrollo de la herramienta software PVACC.

**Figura 1. Esquema de los pasos del proyecto.**



Finalmente, este documento está organizado así:

- El capítulo 2 trata sobre todo lo relacionado con Python, su instalación y las librerías usadas para llevar a cabo este proyecto.
- El capítulo 3 abordan las definiciones de las bases de un arreglo PV además explica de una forma general el modelo matemático que se implementó en Python.
- Dentro del capítulo 4 se hace un breve recorrido sobre la interfaz gráfica dando así una guía de usuario que da la oportunidad de entender las funciones de cada botón de la herramienta y cada espacio que se da para la entrada de datos.
- Los capítulos 5 y 6 muestran los resultados finales y las conclusiones, respectivamente. Estos capítulos dan una visión al usuario sobre lo que se logró con todo el proceso descrito en las secciones anteriores.
- Finalmente, en el capítulo 7 se dan a conocer algunas recomendaciones para mejorar la herramienta, siendo esta la primera versión.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1. JUSTIFICACIÓN**

Muchos modelos de arreglos fotovoltaicos (PV), han sido expuestos a lo largo del tiempo en la literatura, que se esfuerzan por reproducir el efecto de sombreado parcial; sin embargo, para utilizar dichos modelos se deben implementar y por lo tanto se requieren habilidades en programación, y un nivel de experiencia para implementar el modelo deseado. La herramienta software permitirá y facilitará el acceso de diferentes tipos de usuarios bajo diferentes modelos de fuentes fotovoltaicas (PV), para diferentes aplicaciones sin llevar a cabo alguna implementación del modelo desde cero en algún tipo de lenguaje de programación.

La herramienta software podría ayudar a diseñadores de sistemas fotovoltaicos a cuantificar los efectos de las sombras parciales o de las condiciones de operación irregulares en la potencia generada por un arreglo fotovoltaico. También podría ser utilizada para cuantificar la reducción de la energía generada por un arreglo fotovoltaico operando en condiciones irregulares o de sombras parciales.

Por último, en este proyecto se dará inicio a un primer módulo de una herramienta software, que podrá crecer en funcionalidades y obtener una herramienta más robusta para facilitar la implementación de modelos más complejos y así considerar este estudio como un punto de partida para aquellos que estén interesados en el modelado y la reconfiguración fotovoltaica.

## 1.2. OBJETIVOS

**1.2.1. Objetivo general.** Desarrollar una herramienta software para el cálculo de las curvas características de un arreglo fotovoltaico en configuración serie paralelo operando bajo condiciones de sombreados parciales.

### 1.2.2. Objetivos Específicos.

- Implementar un modelo para arreglos fotovoltaicos en configuración serie-paralelo operando bajo condiciones de sombreados parciales que permita calcular las curvas características de corriente vs. tensión y potencia vs. tensión.
- Implementar una interfaz gráfica, en el lenguaje de programación Python, que permita calcular las curvas características de arreglos fotovoltaicos serie-paralelo de diferentes tamaños y bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.
- Validar el funcionamiento de la herramienta software mediante simulación en Matlab.

## 1.3. ALCANCE

Con este trabajo se busca desarrollar una herramienta software que permita generar las curvas características enfocado esencialmente a un generador fotovoltaico operando en condiciones de sombreados parciales. Por un lado, existen varios tipos de arreglos fotovoltaicos, por ejemplo: SS (serie simple), TCT (total-cruzado), BL (puenteado), HC (panal), sin embargo, este trabajo se enfoca en configuración SP (serie paralelo) ya que es la estructura que más se utiliza en los sistemas comerciales y, por otro lado, cabe resaltar que este estudio se va a desarrollar con un modelo ya existente tomado del artículo [1] llamado "Tradeoff".

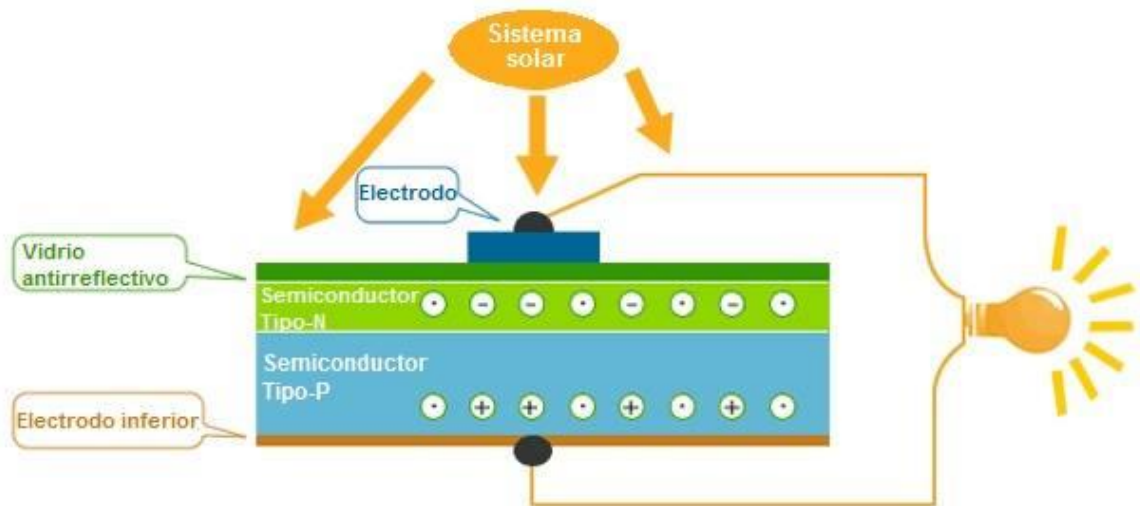
Esta herramienta será un primer módulo o una primera versión que más adelante se podrá modificar para agregarle más funcionalidades alcanzando una interfaz más robusta para modelos más detallados y así poder lograr un uso más amigable por parte de los usuarios.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

### Celda fotovoltaica

Las celdas solares fotovoltaicas (Figura 2) están compuestas por dos capas (una capa absorbente relativamente gruesa y una capa emisora relativamente delgada) de material semiconductor, normalmente Silicio tipo P y tipo N en forma cristalina. Cuando la intensidad solar incide sobre el sustrato de vidrio, las capas son expuestas a la radiación solar convirtiendo la energía de los fotones en energía eléctrica obteniendo corriente directa (DC) por el efecto fotovoltaico [4].

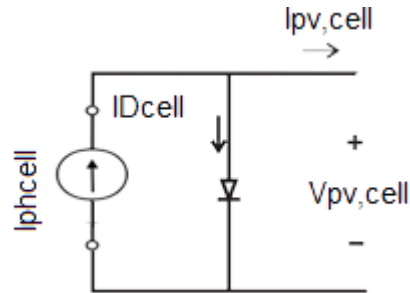
Figura 2. Vista transversal de una celda solar fotovoltaica [5].



Las celdas PV se pueden representar por medio de circuitos equivalentes como el mostrado en la Figura 3. En dicho circuito la fuente de corriente representa la corriente producida por el efecto fotovoltaico y el diodo representa la no linealidad de la unión PN de la celda. La relación entre la corriente de salida de la celda ( $I_{pv,cell}$ ) y la tensión de la celda ( $V_{pv,cell}$ ) se presenta en (1), donde  $I_{phcell}$  es la corriente

producida por el efecto fotovoltaico,  $I_{sat,cell}$  es la corriente de saturación inversa del diodo,  $\eta_{cell}$  es el factor de idealidad del diodo,  $k$  es la constante de Boltzman ( $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K),  $q$  es la carga del electrón ( $1.60217646 \times 10^{-19}$  C) y  $T$  es la temperatura de la celda en K [6].

**Figura 3. Modelo circuital simplificado de una celda solar.**



$$I_{pv,cell}(V_{pv,cell}) = I_{phcell} - I_{sat,cell} \left[ \exp\left(\frac{V_{pv,cell}}{\eta_{cell} \cdot k \cdot T / q}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

### Módulo fotovoltaico

El modelo de diodo simple (Figura 4) es considerado en [1], para el modelado de un módulo fotovoltaico, donde  $R_s$  representa las pérdidas producidas por contactos óhmicos y las uniones metal-semiconductor,  $R_h$  representa las corrientes de fuga entre las capas P y N de la celda. El módulo fotovoltaico está construido a partir  $N_s$  celdas solares conectadas en serie con un diodo de protección, para evitar pérdidas de potencia por las celdas sometidas bajo fuertes efectos de desajuste, como se muestra en la Figura 5.

Figura 4. Modelo de diodo simple de un módulo PV.

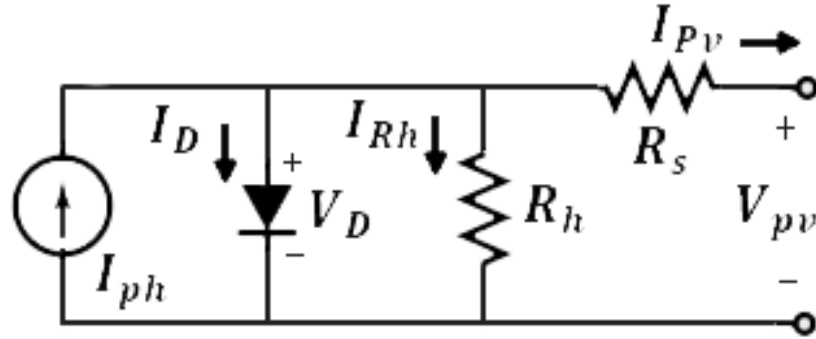
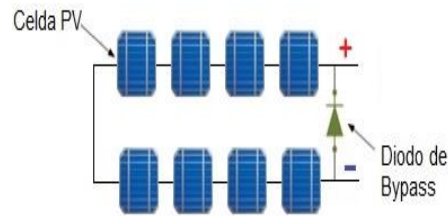


Figura 5. Celdas PV conectas en serie y diodo de protección en anti paralelo (Módulo PV).



Cuando las celdas del módulo operan bajo las mismas condiciones de irradiancia y temperatura se puede extender el modelo de una celda PV a un módulo PV, modificando los parámetros del modelo (STC) como se muestra en (2), donde  $I_{ph}$ ,  $I_{sat}$ ,  $V_{pv}$ ,  $R_s$  y  $R_h$  corresponden a los parámetros del módulo PV. Por lo tanto, la relación entre tensión ( $V_{pv}$ ) y corriente ( $I_{pv}$ ) de un módulo PV está dada por (3).

$$I_{ph} = I_{ph,cell} \quad I_{sat} = I_{sat,cell} \quad V_{pv} = N_s \cdot V_{pv,cell}$$

$$R_s = N_s \cdot R_{s,cell} \quad R_h = N_s \cdot R_{h,cell} \quad \eta = N_s \cdot \eta_{cell} \quad (2)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{\eta \cdot k \cdot T / q} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_h} \quad (3)$$

La variación de la irradiancia ( $G$ ) y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), a la que se encuentran sometidos cada panel fotovoltaico en el arreglo serie paralelo, afecta directamente la cantidad de energía que se genera por el efecto fotovoltaico ( $I_{ph}$ ), mostrado en (4), el voltaje térmico ( $B$ ) en (5) y la corriente de saturación inversa del diodo ( $I_{sat}$ ) calculada en la ecuación (6).

$$I_{ph} = \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \cdot (I_{phSTC} + k_{I_{scSTC}} \cdot (T - T_{STC})) \quad (4)$$

$$B = N_s \cdot n \cdot k \cdot \frac{T}{q} \quad (5)$$

$$A = (I_{scSTC} + k_{I_{scSTC}} \cdot (T - T_{STC})) / \exp\left(\frac{V_{ocSTC} + k_{V_{ocSTC}} \cdot (T - T_{STC})}{B}\right) - 1 \quad (6)$$

Donde,  $G$  ( $W/m^2$ ) representa la irradiancia proporcionada por la luz del sol sobre la superficie de las celdas PV,  $G_{STC}$  y  $T_{stc}$  son la irradiancia y la temperatura (en K) de las celdas medida en condiciones de prueba estándar (STC por sus siglas en ingles),  $k_{I_{scSTC}}$  representa la constante térmica de la corriente de corto circuito,  $k_{V_{ocSTC}}$  es el coeficiente térmico del voltaje de circuito abierto,  $I_{phc,STC}$  es la corriente fotovoltaica en STC,  $V_{oc,STC}$  es el voltaje de circuito abierto, todos estos parámetros bajo condiciones STC.

La temperatura de las celdas ( $T$ ) en (3)-(6) se puede estimar a partir de temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) como se muestra en (7), donde  $G_{NOCT}$  es la temperatura normal de operación de las celdas para una irradiancia de  $800 \left(\frac{W}{m^2}\right)$  y  $T_{amb} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $nc$  es la eficiencia del módulo,  $NOCT$  es la temperatura normal de operación de las celdas en Kelvin, el producto de la transmitancia de la corriente de la celda ( $\tau$ ) y la fracción de radiación absorbida que incide sobre la superficie de la celda ( $\alpha$ ) se considera que tiene un valor aproximadamente de 0.9 ( $\tau \cdot \alpha = 0.9$ ), como se muestra en el modelo propuesto en [1].

$$T = \left( \frac{G}{G_{NOCT}} \right) \cdot (NOCT - 293.15) \cdot \left( 1 - \left( \frac{nc}{\tau \cdot \alpha} \right) \right) + T_{amb} \quad (7)$$

Los parámetros del modelo de un diodo ( $n_{STC}$ ,  $R_{sSTC}$ ,  $R_{hSTC}$ ,  $I_{satSTC}$ ,  $I_{phSTC}$ ) se pueden calcular a partir de las características eléctricas de la hoja de datos, utilizando las ecuaciones propuestas en [1]. La expresión para el cálculo de los parámetros del módulo fotovoltaico, se presentan en (8) - (16), e implementadas en la función **calc\_params\_symbolic** del Anexo A. ( $E_{gap}$  es la energía entre la banda de valencia y la banda de conducción de una celda, con un valor de 1.8e-19)

$$n_{STC} = \frac{kV_{OCSTC} - V_{OCSTC} / T}{N_s \cdot k \cdot \frac{T}{q} \cdot k_{ISCSTC} / I_{phSTC} - 3 / T - E_{gap} / k \cdot T^2} \quad (8)$$

$$I_{phSTC} = I_{SCSTC} \quad (9)$$

$$I_{satSTC} = I_{phSTC} \cdot \exp\left(\frac{-V_{OCSTC}}{n_{STC} \cdot N_s \cdot k \cdot \frac{T}{q}}\right) \quad (10)$$

$$T_1 = V_{mpp} \cdot \frac{2 \cdot I_{mpp} - I_{phSTC}}{n_{STC} \cdot N_s \cdot I_{satSTC} \cdot k \cdot \frac{T}{q}} \quad (11)$$

$$\exp T = \frac{V_{mpp} \cdot (V_{mpp} - 2 \cdot n_{STC} \cdot N_s \cdot k \cdot \frac{T}{q})}{n_{STC}^2 \cdot N_s^2 \cdot (k \cdot \frac{T}{q})^2} \quad (12)$$

$$w = LambertW(T_1 \cdot \exp T) \quad (13)$$

$$x = w + (2 \cdot V_{mpp}) / (n_{STC} \cdot N_s \cdot k \cdot \frac{T}{q}) - (V_{mpp}^2) / (n_{STC}^2 \cdot N_s^2 \cdot (k \cdot \frac{T}{q})^2) \quad (14)$$

$$R_{sSTC} = \frac{x \cdot n_{STC} \cdot N_s \cdot k \cdot \frac{T}{q} - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (15)$$

$$R_{h_{STC}} = \frac{x \cdot n_{STC} \cdot N_s \cdot k \cdot \frac{T}{q}}{I_{ph_{STC}} - I_{mpp} - I_{sat_{STC}} \cdot (\exp(x) - 1)} \quad (16)$$

Para diferentes condiciones de irradiancia ( $G$ ) y temperatura ( $T$ ), los parámetros  $n_{STC}$ ,  $R_{s_{STC}}$ ,  $R_{h_{STC}}$  se pueden asumir constantes, como se definen en (17) - (18); mientras que la dependencia de  $I_{sat}$  e  $I_{ph}$  con la irradiancia y la temperatura se muestra en (4) y (6). Estas funciones se encuentran implementadas en **Test\_Concept\_Serial\_Parameters**, ubicado en el Anexo B.

$$n = n_{STC} \quad (17)$$

$$R_s = R_{s_{STC}} \quad (18)$$

$$R_h = R_{h_{STC}} \quad (19)$$

El cálculo de los parámetros de los diodos de derivación y de bloqueo, se presenta en (20) - (26), como un modelo lineal a trozos por una tensión de umbral ( $V_{thbd_{STC}}$ ) y una resistencia en serie ( $R_{sbd_{STC}}$ ), para cada tipo de diodo se tomaron los mismos valores, donde los diodos de derivación se muestran con la nomenclatura *bd* (*bypass diode*), y los diodos de bloqueo *bld* (*blocking diode*), dichas parámetros se encuentran hallados en el Anexo B. Se trabajó como referencia las características del diodo de derivación SB1520 – SB1540 (Tabla 1).

$$B_{bd_{STC}} = V_f / (\log\left(\frac{I_f}{A_{bd_{STC}}}\right) + 1) \quad (20)$$

$$I_q = I_{ph_{STC}} \quad (21)$$

$$V_q = B_{bd_{STC}} \cdot (\log(I_q / A_{bd_{STC}} + 1)) \quad (22)$$

$$m = A_{bd_{STC}}/B_{bd_{STC}} \cdot \exp\left(\frac{V_q}{B_{bd_{STC}}}\right) \quad (23)$$

$$b = I_q - m \cdot V_q \quad (24)$$

$$V_{thbd_{STC}} = -\frac{b}{m} \quad (25)$$

$$R_{sbd_{STC}} = \frac{1}{m} \quad (26)$$

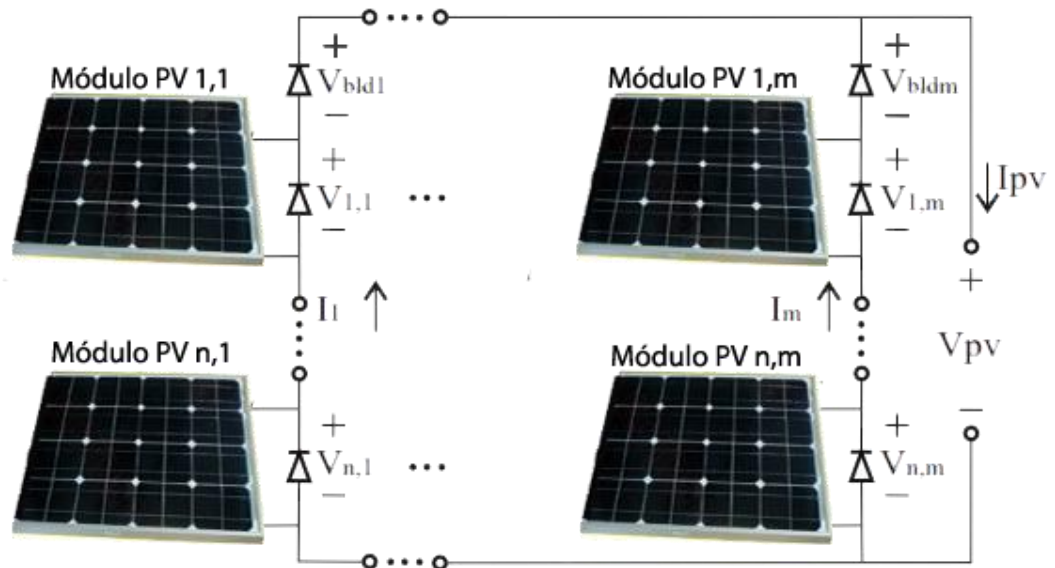
**Tabla 1. Parámetros del diodo de Bypass/Bloqueo T=125 [°C]**

<b>Parámetros del diodo de Bypass/Bloqueo T=125 [°C]</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Corriente de saturación inversa del diodo en STC	Abdstc	0.5x10 <sup>-6</sup> [A]
Corriente de forward	If	5 [A]
Tensión de forward	Vf	0.25 [V]

### **Arreglos fotovoltaicos**

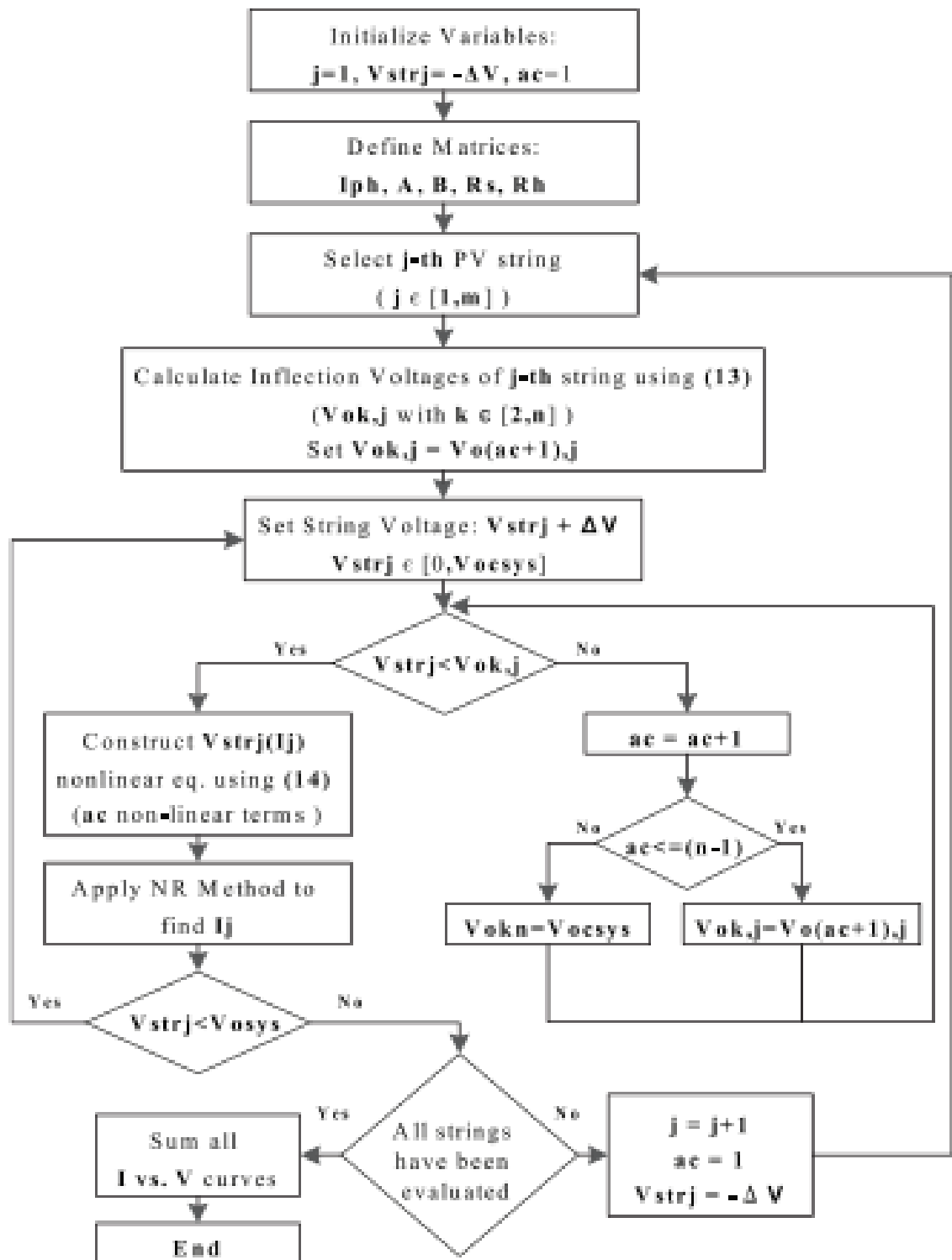
Los paneles incluyen uno o mas módulos PV, que pueden ir conectados en serie dentro de una misma estructura mecánica, y en consideración de los mismos parámetros para cada uno (Anexo C - D). En los sistemas fotovoltaicos comerciales se interconectan varios paneles en serie formando cadenas, que conectadas en paralelo construyen un arreglo en configuración serie paralelo (SP) como se muestra en la Figura 6. Los diodos de bloqueo conectados en serie con las cadenas PV (Figura 6), ayudan a direccionar el flujo de la corriente hacia la carga externa, evitando corrientes inversas en las celdas PV [1].

Figura 6. Modelo de un arreglo fotovoltaico en configuración serie paralelo.



Un arreglo fotovoltaico en configuración SP como se muestra en la Figura 6, consta de  $n$  módulos conectados en serie y  $m$  cadenas conectadas en paralelo. Cada cadena tiene un diodo de bloqueo conectado en serie para direccionar el flujo de la corriente hacia la carga externa, evitando corrientes inversas en las celdas. Cada módulo tiene un diodo de derivación conectado en anti-paralelo con el fin de evitar la disipación excesiva de las celdas fotovoltaica con menor irradiancia.

Figura 7. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto en [1]



El digrama de flujo de la figura 7, describe el algoritmo propuesto por el modelo que se presenta en [1], para el análisis del desempeño de un arreglo fotovoltaico, en la predicción de las curvas características bajo diferentes condiciones de desajuste.

Dicho proceso se aplica para el calculo de la corriente del arreglo fotolvoltaico, a partir del analisis de cada cadena. El voltaje de inflexión ( $V_{o_{k,j}}$  con  $k \in [1, n]$ ) es la tensión minima de la j-esima cadena que desactiva el k-esimo módulo fotovoltaico, tal condicion se cumple cuando la corriente de la cadena j-esima es mayor que la corriente de corto circuito del modulo k ( $I_j = I_{SC_{k,j}}$ ). Para su calculo se toma en cuenta las resistencias en serie y paralelo del modulo ( $R_s, R_h$ ) y utiliza el modelo lineal a trozos para representar los diodos de derivación y de bloqueo.

$$V_{o_{k,j}} = \sum_{m=1}^{k-1} V_{am_{m,j}(I_{SC_{k,j}})} + \sum_{p=k}^n V_{im_{p,j}(I_{SC_{k,j}})} - V_{bld_j}(I_{SC_{k,j}}) \quad (27)$$

En (27) se muestra la ecuacion para el calculo del voltaje de inflexión que depende de los elementos activos (módulos, diodos de derivación, diodo de bloqueo) en la cadena. Los puntos de inflexion representan no mas de n-1 módulos presentes por cadena.

Para el calculo de la tensión de la cadena j-esima ( $V_{str_j}$ ), en funcion de la corriente de cadena ( $I_j$ ), se toma en cuenta las tensiones de los ementos activos en la cadena como se muestra en (28), en donde  $ac$  representa el numero de módulos activos por cadena y  $n$  el número de modulos presentes en la cadena. El número de terminos no lineales dependen del número de módulos que se encuentren activos en la cadena.

$$V_{str} = \sum_{i=1}^{ac} V_{am_{i,j}(I_j)} + \sum_{p=ac+1}^n V_{im_{p,j}(I_j)} - V_{bld_j}(I_j) \quad (28)$$

El calculo de la corriente de la cadena ( $I_j$ ), se expresa a partir de la tension de cada módulo fotovoltaico como una función explicita mediante la funcion Lambert-W y la simplificación lineal por trozos de los diodos de derivación y de bloqueo, donde  $I_j$  se calcula utilizando el metodo de Newton Raphson.

Por ultimo son sumadas las corrientes de cada cadena ( $I_j j \in [1, m]$ ) para obtener la corriente que se esta generando en el arreglo PV. El Anexo C – D presenta la implentacion de las funciones para estimar la cantidad de energia que genera un arreglo fotovoltaico en configuración serie paralelo (**f\_Juan\_Model\_Ibd\_correction - FandJi\_Vo\_Vth\_Rsbd\_Ibd\_correction**).

### **3. INSTALACIÓN DE PYTHON Y LAS LIBRERÍAS NECESARIAS**

#### **3.1. DEFINICIÓN DE PYTHON**

Python es un lenguaje de programación orientado a objetos, capaz de realizar cualquier tipo de programa desde aplicaciones Windows a servidores de red o incluso, páginas web [7]. Este lenguaje cuenta con varias ventajas como la rapidez de desarrollo, la sencillez y velocidad con la que se crean los programas (es decir, un programa en Python puede tener de 3 a 5 líneas de código menos que su equivalente en Java o C), las múltiples plataformas en las que se puede trabajar, además de que Python es gratuito para todos los propósitos ya sean académicos y/o empresariales [7].

Se escogió Python para el desarrollo de la herramienta software por sus numerosas ventajas explicadas anteriormente, además de que este lenguaje cuenta con una cantidad grande de librerías y funciones incorporadas que facilitan la elaboración del trabajo.

#### **3.2. INSTALACION DE LIBRERIAS**

La herramienta principal de todo este proyecto es Python y su estructura de programación, por eso se realizó una profunda búsqueda acerca de las librerías más importantes de este software.

Existe una variedad de módulos relevantes que Python ofrece desde su extenso mundo, entre los cuales tenemos a *Tkinter* [8], siendo una librería que permite obtener funciones para el desarrollo de interfaces gráficas, utilizando un conjunto

de objetos gráficos para simbolizar las acciones que están disponibles en la interfaz [9] y así poder tener una interacción con el usuario .

Más allá de lo gráfico, se tiene la parte matemática, que es un factor muy importante dentro de esta aplicación, por ende, cabe resaltar que el módulo que se utilizó fue *Numpy* [10], una reconocida librería para los programadores de Python, que contiene un gran soporte en matrices y vectores, además de tener una fuerte utilidad dentro del álgebra lineal, transformada de Fourier, entre otros [10]. Numpy cumple una función importante dentro del proyecto, ya que permite representar todas las ecuaciones a nivel interno de la herramienta, permitiendo toda operación básica para el cómputo de los datos que el usuario accede al software.

No se puede dejar atrás el módulo llamado *Math*, el cual da acceso a diferentes funciones matemáticas que se trabajan solo con números reales abarcando un extenso listado, entre las cuales se puede encontrar las trigonométricas, logarítmicas, exponenciales e hiperbólicas [11].

Dentro de este recuento, vale la pena resaltar una librería que recibe el nombre de *inspect* [12], la cual permite extraer y actualizar la lista de argumentos de una función, un módulo, una clase, etc.

Finalmente, para esta etapa se culminó realizando una búsqueda acerca de las librerías que permitieran graficar las curvas características corriente vs tensión y potencia vs tensión, dando como resultado la gran biblioteca *Matplotlib* [13], la cual trata de que las cosas sean fáciles y las difíciles sean posibles. Matplotlib es un módulo gráfico de Python en cualquiera de sus versiones, que da la facilidad de graficar innumerables aplicaciones como por ejemplo histogramas, espectros de potencia, diagramas de dispersión, entre otras [13]. Esta librería jugó un papel indispensable, ya que le permite al usuario visualizar las gráficas que se generan a partir de los datos ingresados en la herramienta.

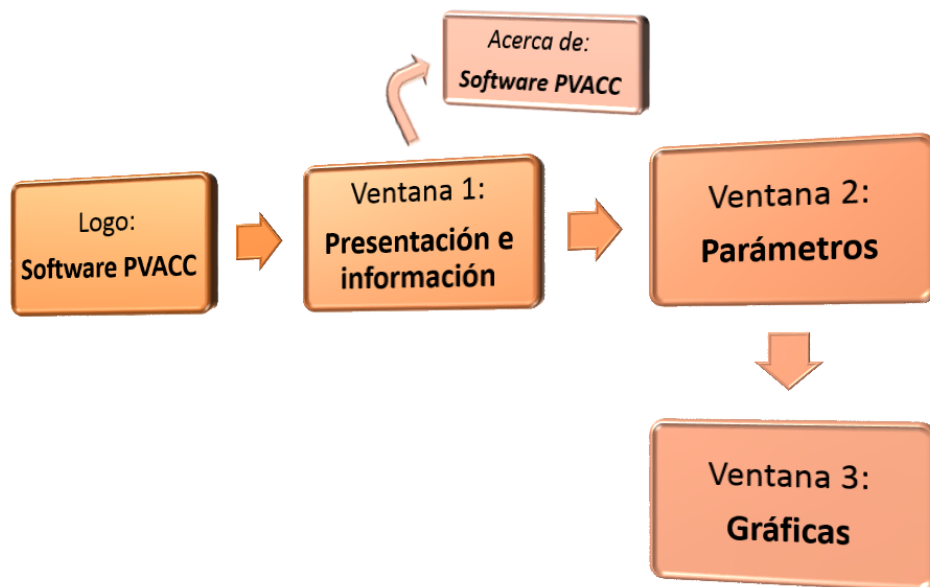
### **3.3. INSTALACION DE PYTHON**

Teniendo en cuenta las librerías que se seleccionaron para trabajar dentro de este proyecto, se realizó un proceso de instalación del programa Python llegando a escoger la versión 3.4 de 32 bits [14], siendo un paquete más completo y funcional, ya que permitió el correcto uso las librerías definidas anteriormente. Este programa se instaló en un sistema operativo Windows 7 Professional de 64 bits.

#### 4. INTERFAZ GRÁFICA

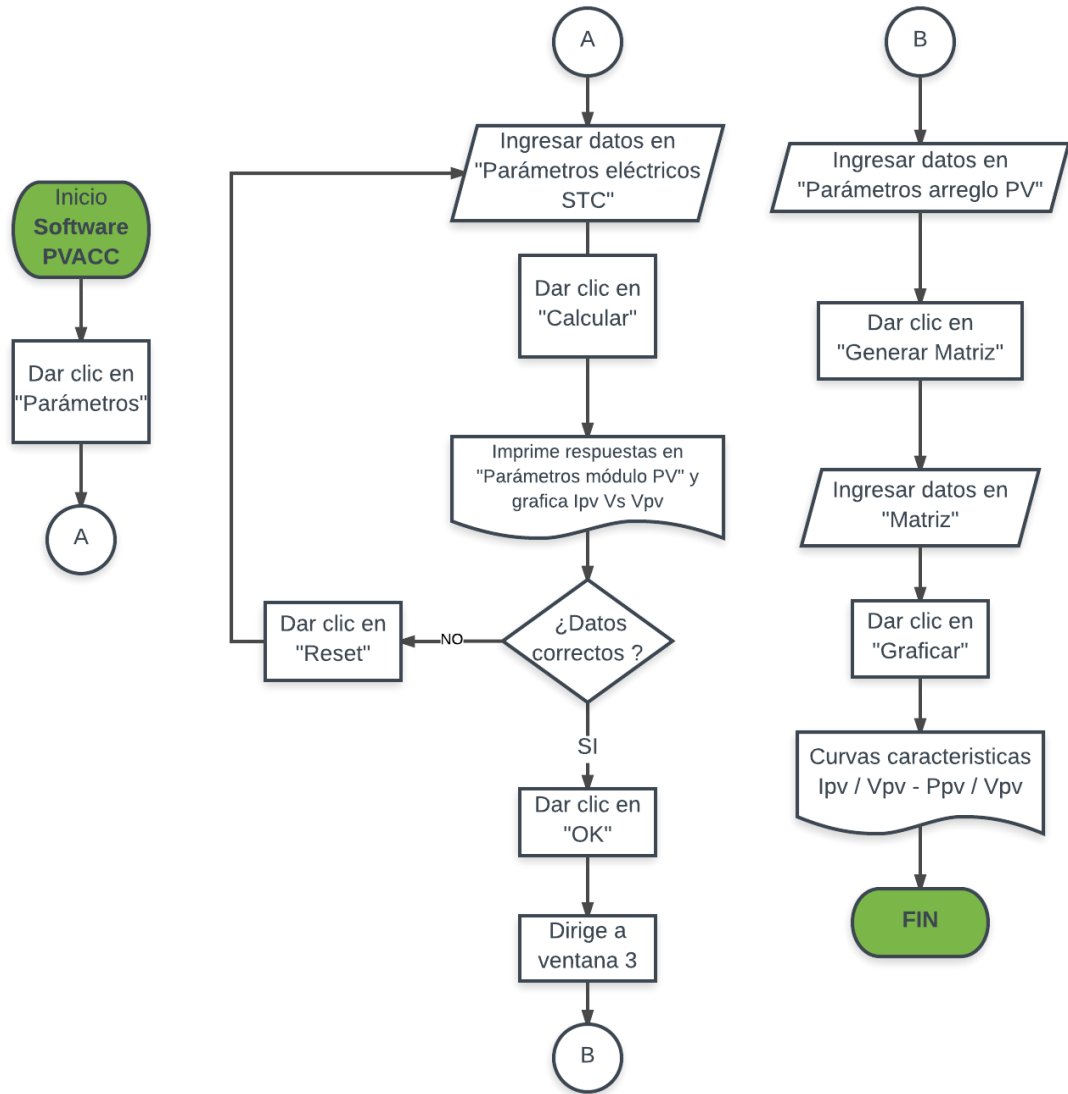
A continuación, se presenta un recorrido rápido por todo el software para guiar al usuario dándole una breve explicación del correcto uso de toda la herramienta. Para comenzar, en la figura 8 se muestra un diagrama que dará a conocer la interacción entre las ventanas.

**Figura 8. Diagrama de interacción entre las ventanas.**



Posterior a esto en la figura 9 se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento de las ventanas entre si y de cada una.

**Figura 9. Diagrama de flujo de funcionamiento de las ventanas.**



Dejando claro lo anterior, se procede a explicar cada detalle de las ventanas para que el usuario tenga una mejor visión de cada una.

Iniciando se presenta el software cargando como se observa en la figura 10, el usuario debe esperar unos segundos mientras aparece la ventana de presentación e información (ventana N° 1). En el anexo E se muestra el código de programación para el logo del software.

**Figura 10. Cargando software PVACC**



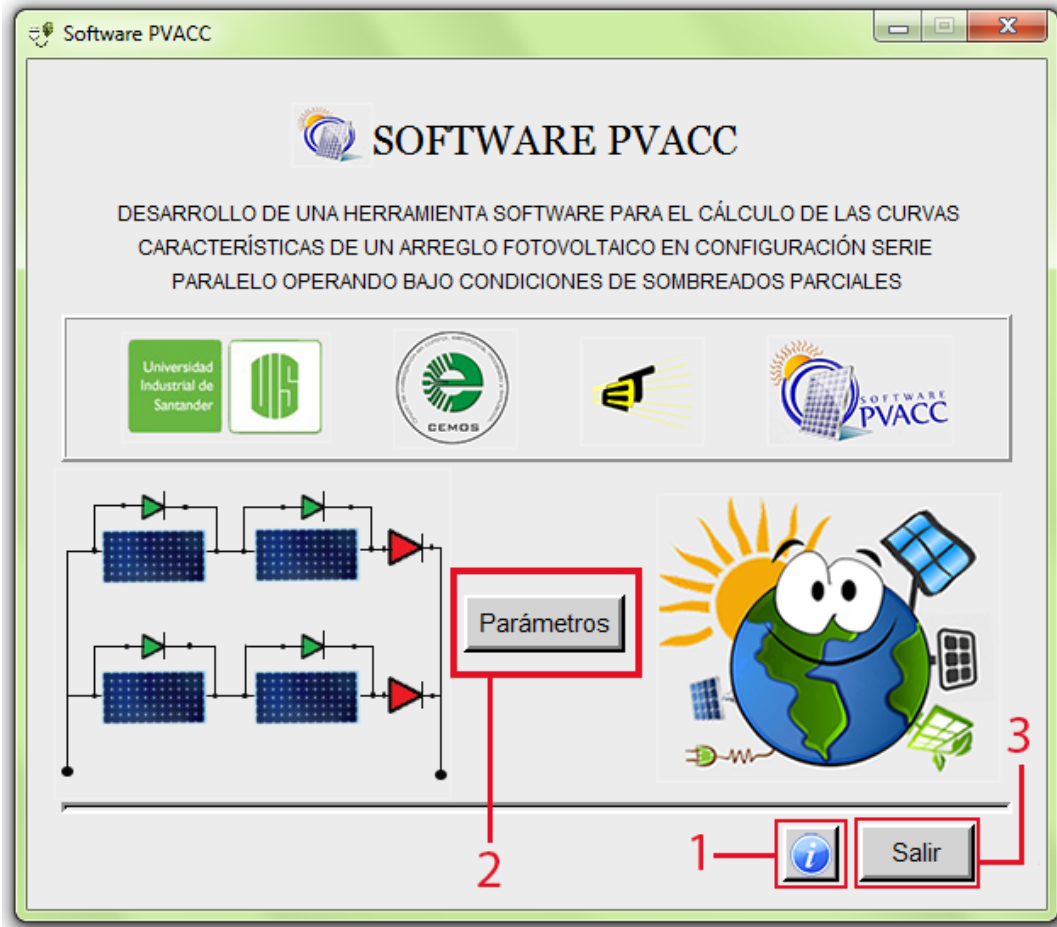
#### **4.1. VENTANA 1: PRESENTACIÓN E INFORMACIÓN.**

En la figura 11 se observa la ventana N°1 en donde el usuario podrá conocer el nombre del software, el título del proyecto y los logos de las entidades académicas que están relacionadas con el mismo además en el Anexo F se puede apreciar el proceso de programación en Python que se realizó para llegar al resultado final de la ventana. En este escenario se observan 3 opciones para elegir, las cuales se describen a continuación:

- 1. PVACC:** En la figura 12 se puede apreciar la ventana correspondiente a este botón, el cual cumple la función de dirigir al usuario a la información general dando a conocer los nombres de las personas involucradas dentro de este trabajo con sus correos de contacto, así como también la referencia en donde se encuentra el modelo matemático propuesto para el desarrollo de la herramienta.
- 2. Parámetros:** Su única función es enviar al usuario a la ventana N°2 la cual se expondrá en el próximo ítem.

3. **Salir:** Este botón se encarga de darle la opción al usuario de salir totalmente del programa.

**Figura 11. Ventana de presentación e información (Ventana N°1).**



**Figura 12. Ventana de “Acerca de CCPV”.**



#### **4.2. VENTANA 2: PARÁMETROS.**

Posterior a esto, se encuentra la ventana N°2 (Figura 13) siendo la más interactiva con el usuario, en donde se encuentra una serie de casillas para el ingreso de datos necesarios que sirven para el cálculo de las curvas características. En el Anexo G se encuentra el código de programación correspondiente a esta ventana y en la siguiente figura se puede apreciar dicha ventana.

En el Anexo A se encuentra la función matemática respectiva para esta ventana, la cual genera los vectores de la curva e imprime los valores que se encuentran en el recuadro llamado “Parámetros Modulo PV”.

Figura 13. Ventana de parámetros (Ventana N°2)

Software PVACC

Archivo 8

1 Ingrese las características eléctricas STC del panel fotovoltaico brindadas por la hoja de datos. El software PVACC considera importante cada dato correspondiente al arreglo PV, para generar las curvas características bajo diferentes condiciones de desajuste.

2 Tipo de Panel Solar: EDRM85 1

3 Características Eléctricas STC

Isc[A]: 5.13	KIsc[%/°C]: 0.0253
Voc[V]: 21.78	KVoc[%/°C]: -0.339
Imp[A]: 4.8	NOCT[°C]: 45
Vmpp[V]: 17.95	Eficiencia[%]: 15
Ns: 36	Diodo Bypass: 2

4 Parámetros Módulo PV

Iph [A]: 5.13	Rs [Ω]: 0.203
Isat [A]: 4.44e-10	Rh [Ω]: 226.0
Ipv [A]: [ 5.13 5.12	Vpv [V]: [ -1.04 1.2

5

6

7

Reset Calcular OK

Corriente - Tensión STC

Y-axis: Ipv [A] (0 to 6)

X-axis: Vpv [V] (0 to 24)

1. **Recuadro de información:** Como primer paso para el recorrido de esta ventana se recomienda tener en cuenta el recuadro de información que se encuentra en la parte superior. Todo usuario debe leer este mensaje con el fin de que se entienda que cada uno de los parámetros requeridos en la ventana son indispensables para que el software PVACC pueda generar de forma correcta y sin ningún problema las curvas características.

- 2. Tipo de Panel Solar:** En esta casilla el usuario tendrá la oportunidad de escribir el nombre del panel, ya que es importante saber a qué tipo de panel solar se le va a realizar el análisis.

*Nota: Para los siguientes pasos se debe tener en cuenta las unidades en las que se trabajan cada parámetro.*

- 3. Parámetros Eléctricos STC:** En este numeral el usuario deberá ingresar cada uno de los parámetros eléctricos bajo condiciones STC del panel que va a utilizar en el arreglo, respetando las unidades de cada parámetro. En la tabla 1 se muestra el nombre y unidades de cada una de las variables.
- 4. Parámetros Módulo PV:** En este espacio se imprime cada uno de los parámetros hallados del módulo del diodo simple representado en la gráfica que se muestra dentro de esta misma ventana.
- 5. Reset:** La función de este botón es que cuando el usuario desee limpiar los datos ingresados por cualquier razón, solo tenga que clicar y automáticamente se borre todo su trabajo para volver a comenzar.
- 6. Calcular:** Este botón sirve para que cuando el usuario llene la casilla del numeral 3 (Parámetros Eléctricos STC) y haga clic se calculen los parámetros del numeral 4 (Parámetros Módulo PV) y a su vez se genere la curva característica corriente / tensión ( $I_{pv}$  Vs  $V_{pv}$ ) bajo condiciones regulares del módulo de diodo simple.
- 7. OK:** La función de este botón es dirigir al usuario a la tercera ventana en donde se encuentra un escenario para generar las curvas características bajo condiciones irregulares.

**8. Archivo:** Dentro de esta barra de herramientas se puede encontrar algunas opciones necesarias para que el usuario tenga la oportunidad de abrir trabajos ya realizados y además cerrar el software de manera total.

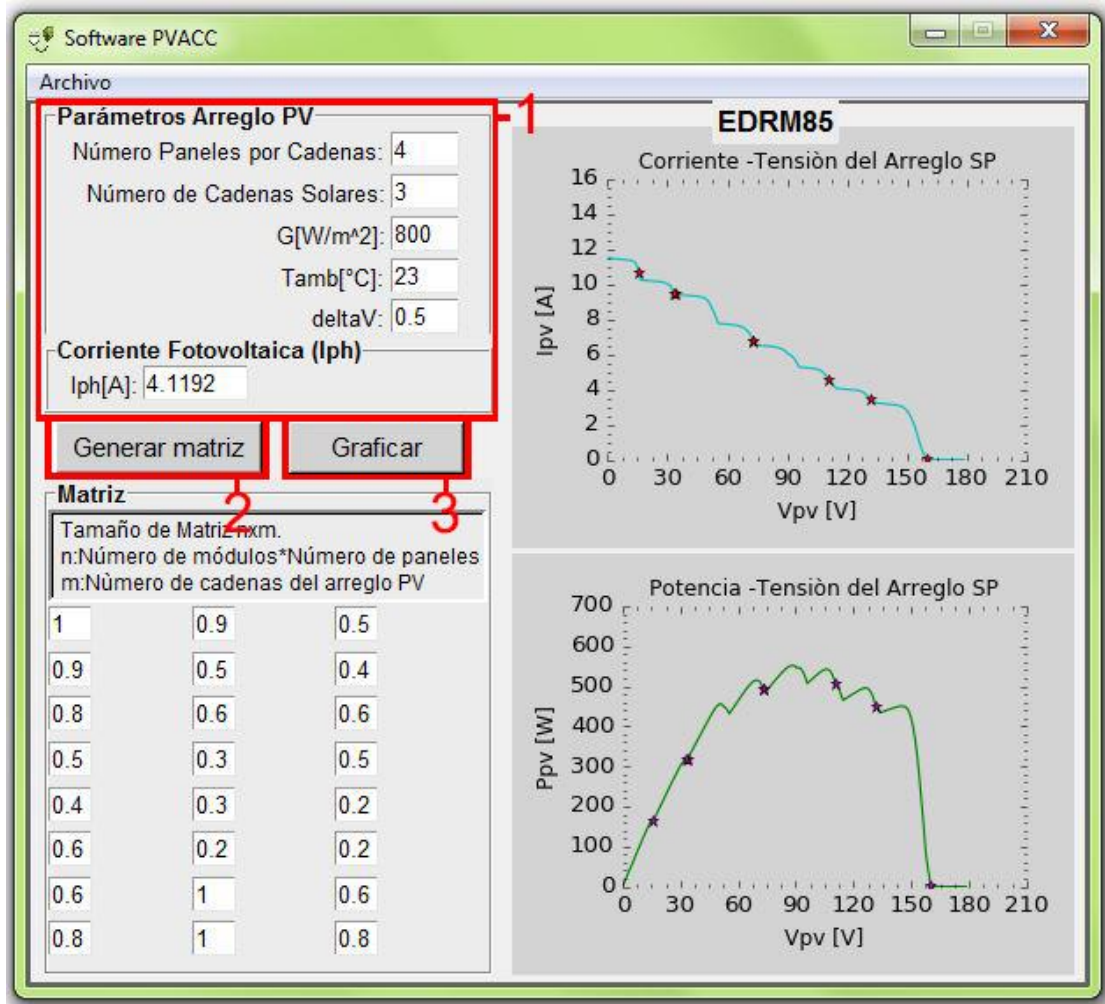
### **4.3. VENTANA 3: GRÁFICAS.**

El software también cuenta con una tercera ventana, la cual permite al usuario generar las dos curvas características por separado en condiciones irregulares.

El usuario podrá encontrar el proceso de programación en el anexo H y en la figura 14 se podrá apreciar el resultado de dicho proceso.

Dentro del Anexo C se encuentra la función matemática que trabaja internamente para esta ventana, la cual toma los valores de entrada del recuadro “Parámetros Arreglo PV” e imprime los vectores de las curvas presentadas.

Figura 14. Ventana gráfica (Ventana N°3)



- 1. Parámetros Arreglo PV:** De igual manera que en la ventana anterior se tiene un recuadro de parámetros que son indispensables para el correcto funcionamiento del software PVACC. En este caso se trata de los parámetros del arreglo fotovoltaico que se está trabajando.
- 2. Generar matriz:** El usuario es libre de escoger el tamaño del arreglo con casillas interactivas, por esta razón se propone un espacio en donde tenga la oportunidad de definir el Número de Cadenas Solares (vertical) y el Número de Paneles por Cadenas (horizontal) que tiene el arreglo que se está trabajando.

Además, debe definir sobre cada una de las casillas (módulos) la irradiancia (G) a la que se encuentra expuesto, es decir, el usuario deberá especificar en una escala de cero a uno (0-1) la intensidad solar de cada uno de los módulos que forman el arreglo PV, siendo 0 la más baja y 1 la más alta.

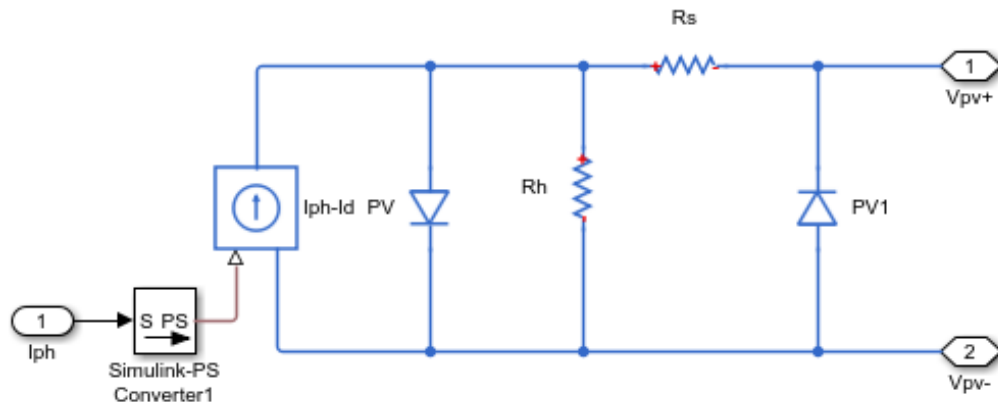
- 3. Graficar:** Al clicar aquí se da como resultado las gráficas de las curvas características Corriente/Tensión y Potencia/Tensión bajo condiciones de sombreado parcial.

Al igual que en la ventana anterior se tiene un menú desplegable en la parte superior izquierda llamado "Archivo".

## 5. RESULTADOS

Para la validación de los resultados que se obtuvieron en la herramienta software PVACC, se compararon los resultados con un modelo circuital implementado en Simulink, en donde cada módulo se presenta como un modelo de diodo simple junto con el diodo de derivación (PV1) en anti paralelo como se muestra en la figura 15, en la cual se hallaron los valores de cada parámetro ( $n_{STC}$ ,  $R_{sSTC}$ ,  $R_{hSTC}$ ,  $I_{satSTC}$ ,  $I_{phSTC}$ ) del módulo y del diodo de derivación ( $V_{th_{bdSTC}}$ ,  $R_{th_{bdSTC}}$ ) a partir de los cálculos mostrados en el capítulo 2, basado en el artículo [1]. Con el fin de facilitar la asignación de los parámetros se colocaron los mismos valores para cada uno de los módulos implementados dentro del arreglo fotovoltaico.

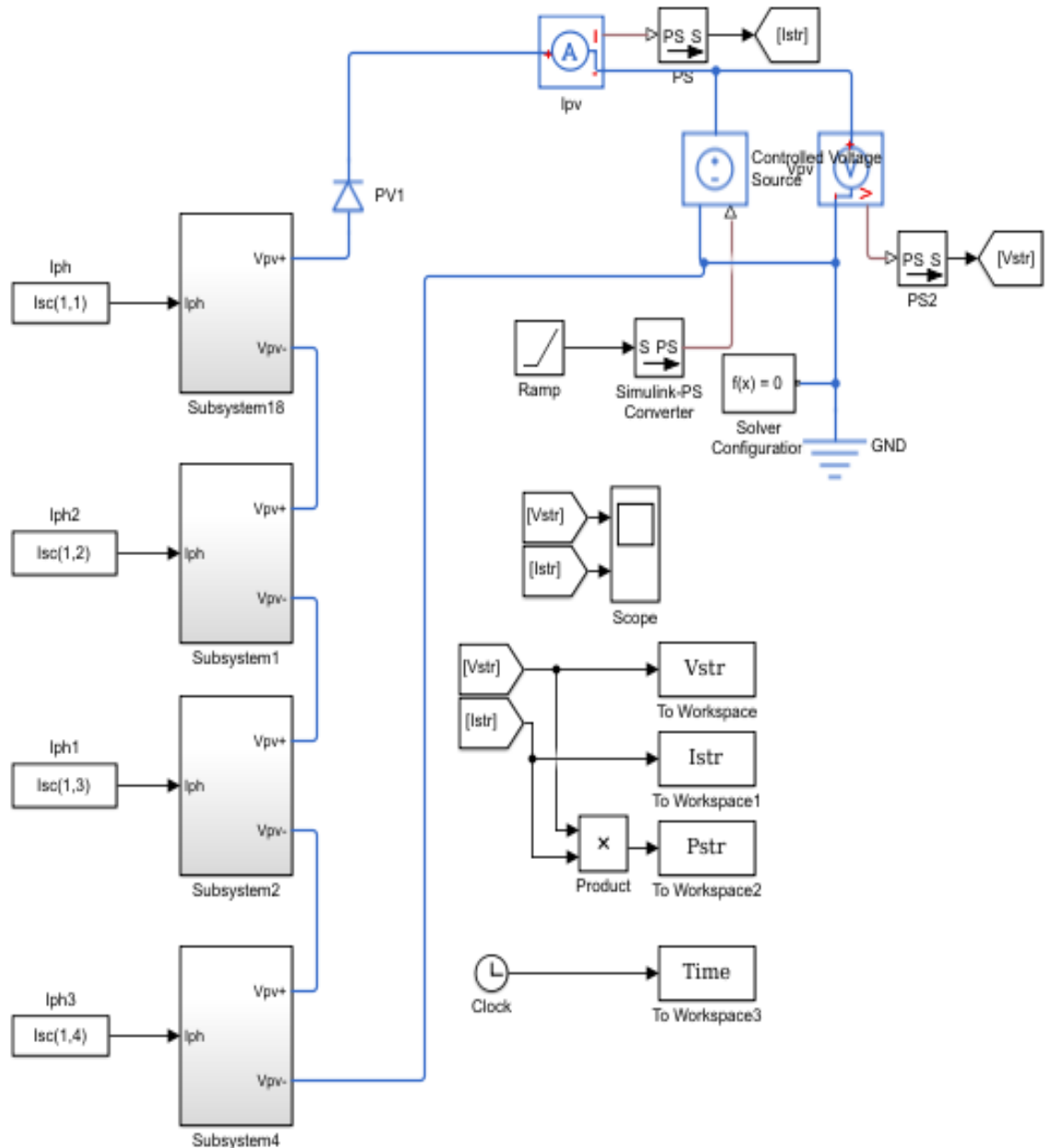
**Figura 15. Modelo de diodo simple junto con un diodo de derivación en anti paralelo de uno de los módulos del modelo circuital implementado en Simulink.**



El modelo circuital de un arreglo fotovoltaico es construido a partir de la conexión de  $n$  módulos (figura 6) en serie conectados a un diodo de bloqueo para formar cada cadena, que unidas en paralelo forman el arreglo serie paralelo con el cual se va a trabajar, como se presenta en la figura 15. El modelo utiliza una fuente de tensión

dependiente en rampa para mantener un voltaje determinado que va desde cero a la tensión máxima que pueda generar el arreglo fotovoltaico.

**Figura 16. Modelo circuital implementado en Simulink para un arreglo PV de tamaño 4X1.**



- **ARREGLO FOTOVOLTAICO SERIE PARALELO 4X1 (4 módulos x 1 cadena)**

Para el desarrollo de las pruebas se utilizó como modelo el panel ERDM85, del cual se extrajeron de la hoja de datos, las características eléctricas presentadas en la figura 17 dentro del recuadro de “Parámetros Eléctricos STC”, para hallar cada uno de los parámetros del módulo fotovoltaico, de los diodos de derivación y de los diodos de bloqueo, como se presenta en la figura 17 en el recuadro llamado “Parámetros Modulo PV”.

A partir de dichos parámetros se define el tamaño del arreglo, que para la primera prueba tiene un tamaño de dos paneles con una cadena, es decir, el arreglo cuenta con 4 módulos, 4 diodos de derivación y un diodo de bloqueo, como se presenta en la figura 16.

**Figura 17. Características eléctricas y parámetros del modulo PV.**

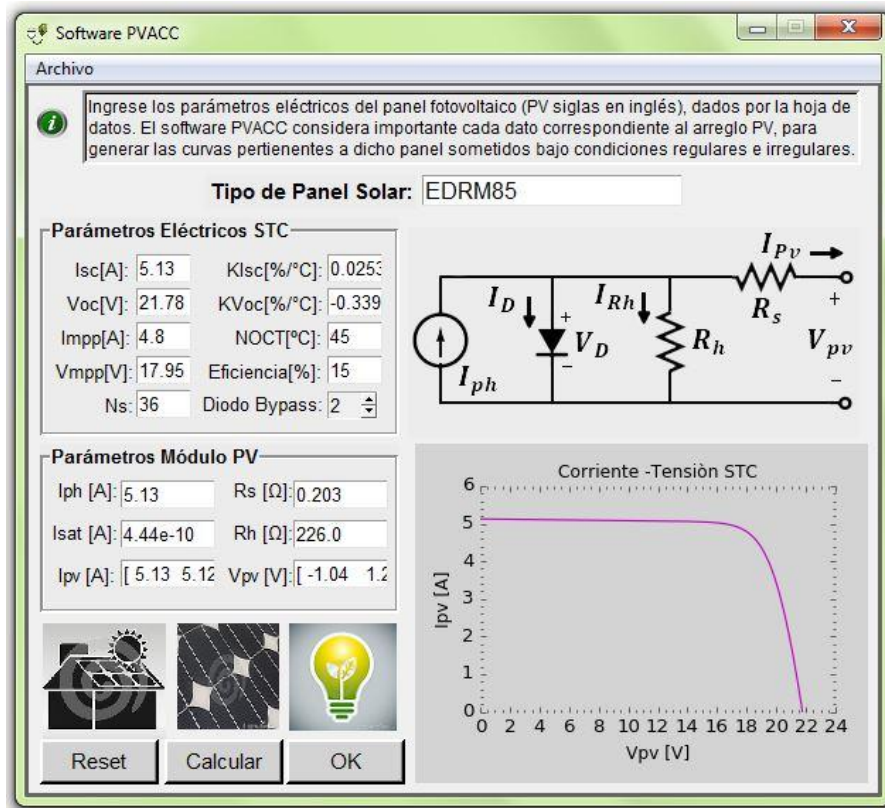
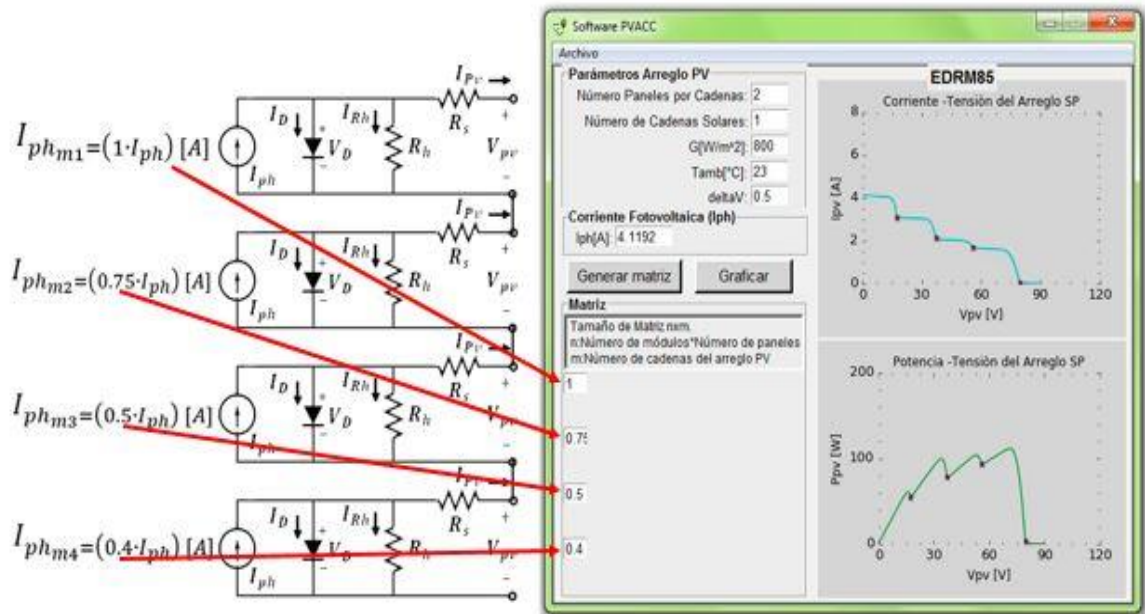
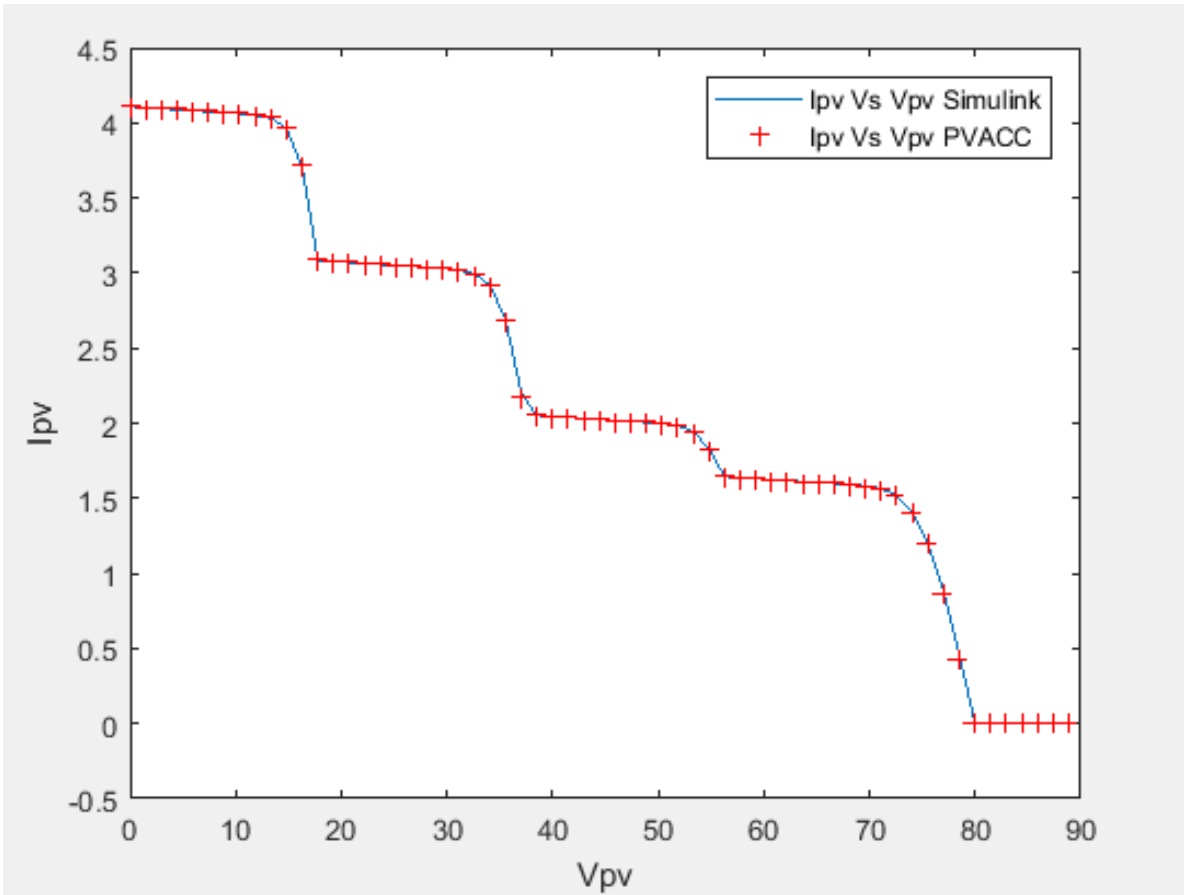


Figura 18. Matriz bajo condiciones de sombreado parcial del arreglo fotovoltaico en prueba.

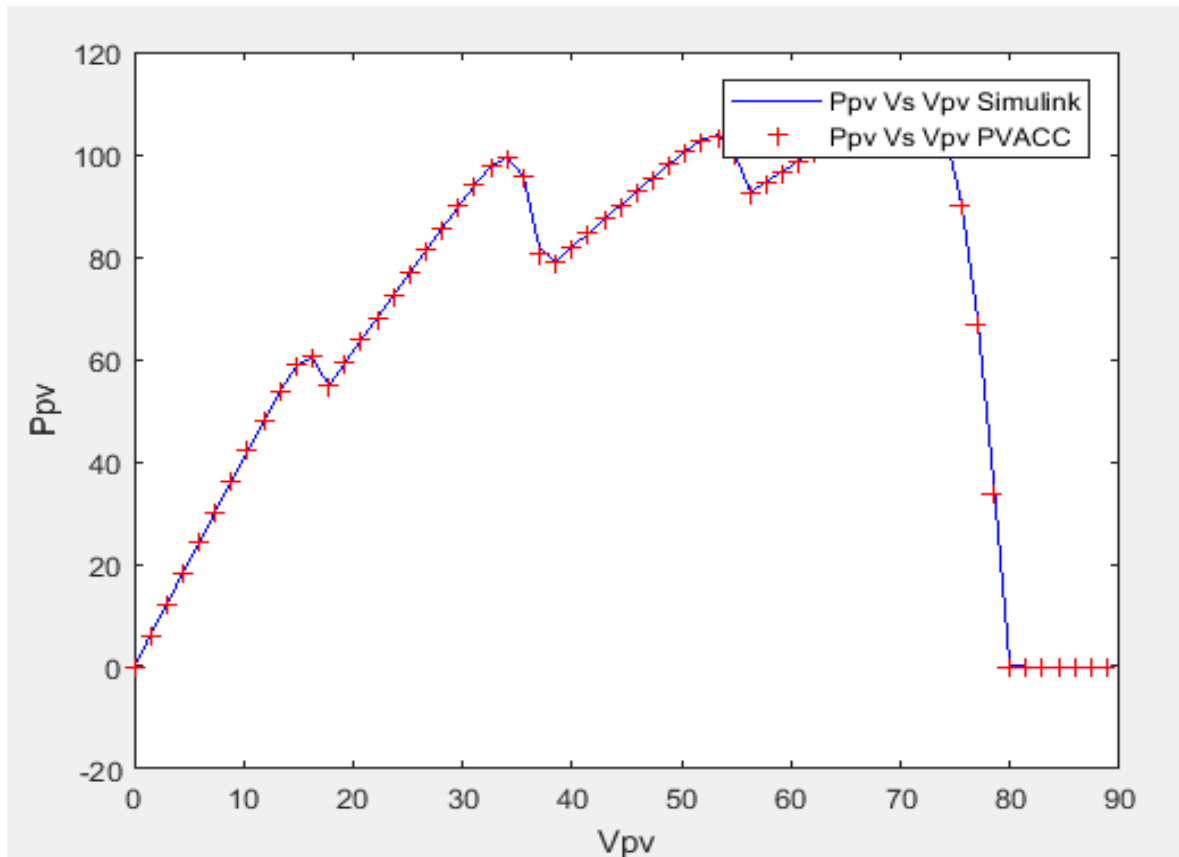


En la figura 18 se presenta la matriz bajo condiciones de sombreado parcial (0 a 1) en donde la corriente  $I_{ph}$  es afectada directamente por la irradiancia de cada modulo definida por el usuario. Para el primer análisis del arreglo fotovoltaico de tamaño 4X1, los datos de la matriz son implementados en Simulink para generar la tensión ( $V_{Circuit}$ ) y la corriente ( $I_{Circuit}$ ) de salida del arreglo PV, guardados en un archivo .mat, para llevar a cabo la comparación de los resultados teóricos (*Simulink*), con los experimentales (*software PVACC*), graficados en MatLab como se muestra a continuación.

**Figura 19. Curva característica Corriente / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 4X1.**



**Figura 20. Curva característica potencia / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 4X1.**



La curva de color azul en la figura 19, presenta el valor teórico (Simulink) como una línea continua y el valor experimental (software PVACC) se presenta con el símbolo (+) en color rojo, en la cual se puede deducir que el software PVACC, representa de manera correcta la caracterización de las curvas corriente/tensión ( $I_{pv}$  vs  $V_{pv}$  en la figura 19) y potencia/tensión ( $P_{pv}$  vs  $V_{pv}$  en la figura 20), del arreglo fotovoltaico de tamaño 4X1, bajo condiciones de sombreado.

El cálculo del error porcentual (ecuación 29) es hallado para conocer el porcentaje, al comparar el valor teórico-experimental del arreglo fotovoltaico en configuración serie paralelo de tamaño 4X1 expuesto con anterioridad.

$$E\% = \frac{|Valor\ te\acute{o}rico - Valor\ experimental|}{Valor\ te\acute{o}rico} \times 100\% \quad (29)$$

Para dicho cálculo se extrajeron los parámetros hallados de la corriente generada por el arreglo fotovoltaico ( $I_{pv}$ ), tanto en Simulink como en el software PVACC en Excel 2016, para hallar la inexactitud de los mismos en 30. Los vectores de las corrientes extraídas de cada lenguaje de programaci3n (MatLab/Python) se encuentra ubicada en el Anexo I.

$$E\%_{Total} = \frac{\sum E\%}{Numero\ de\ muestras} = \frac{7,11876502}{60} \quad (30)$$

$$E\% = 0.1186\%$$

Para calcular el error de la curva Potencia / Tensi3n se extrajeron los parámetros hallados de la potencia generada por el arreglo fotovoltaico ( $P_{pv}$ ), en cada uno de los programas. En la ecuaci3n 31 se observa dicho calculo y las tablas correspondientes se encuentran en el Anexo J.

$$E\%_{Total} = \frac{\sum E\%}{N\acute{u}mero\ de\ muestras} = \frac{7,1188}{60} \quad (31)$$

$$E\% = 0.1186\%$$

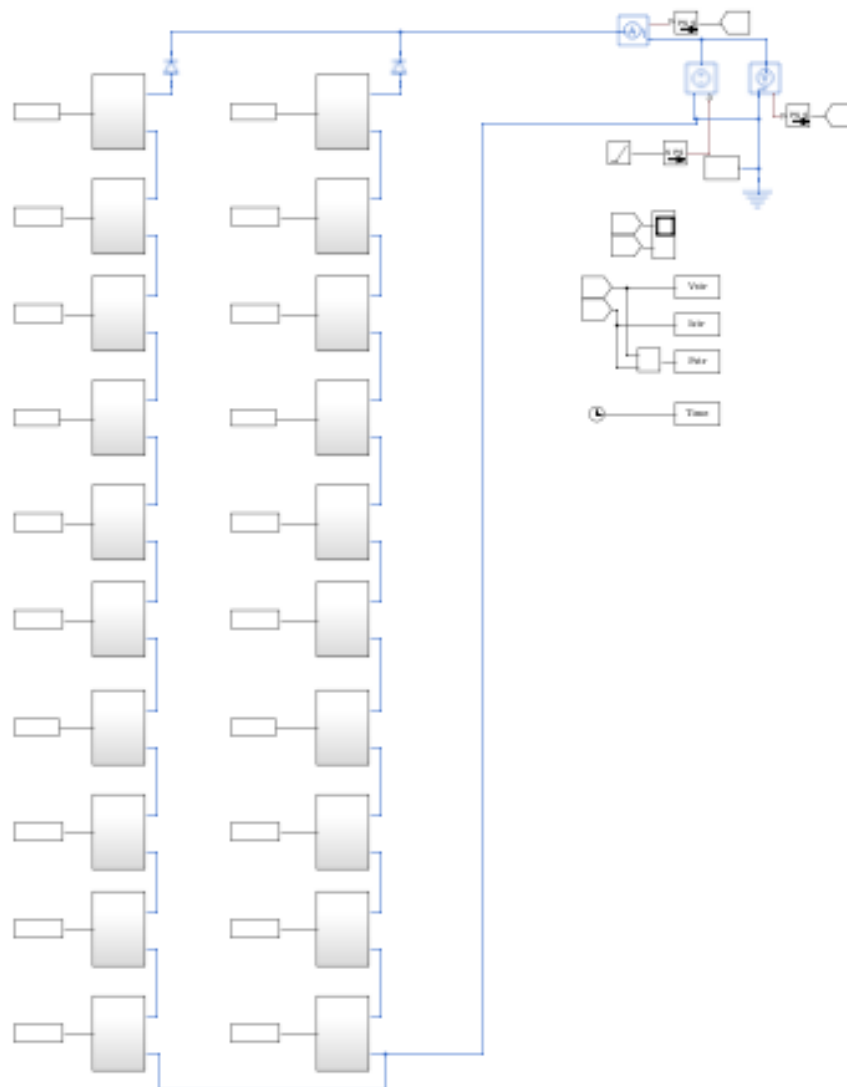
En calidad al error se puede constatar la eficiencia y la precisi3n del software PVACC para el cálculo de las curvas características en configuraci3n serie paralelo 4X1, al compararlo con el modelo circuital implementado en Simulink (figura 16).

- **ARREGLO FOTOVOLTAICO SERIE PARALELO 10X2 (10 m3dulos x 2 cadenas)**

Para esta prueba se tomaron los valores de los parámetros utilizando las características eléctricas del panel ERDM85.

Calculados los parámetros de un módulo, se procede a definir el tamaño del arreglo fotovoltaico 10X2, construido con 5 paneles (10 módulos) y 2 cadenas, expuesto en la figura 21 extraída de Simulink.

**Figura 21. Modelo circuital implementado en Simulink para un arreglo de tamaño 10X2.**



La matriz bajo condiciones de sombreado parcial del arreglo fotovoltaico de tamaño 10X2 se extrajo del software PVACC y se presenta en la figura 22.

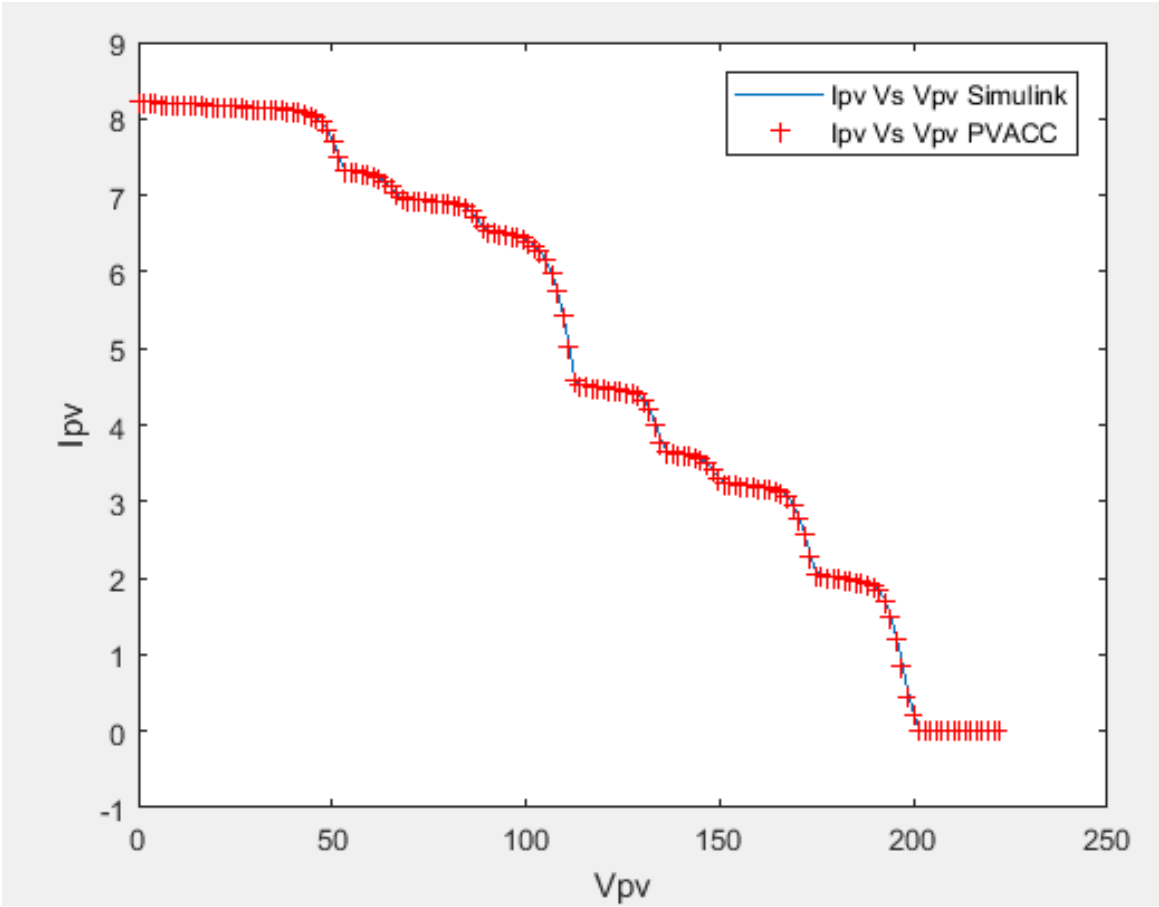
**Figura 22. Matriz bajo condiciones de sombreado parcial del arreglo fotovoltaico en prueba.**

Matriz	
Tamaño de Matriz nxm.	
n:Número de módulos*Número de paneles	
m:Número de cadenas del arreglo PV	
0.5	1
1	0.3
0.9	0.9
1	0.5
0.3	0.6
0.8	1
0.3	0.9
1	0.6
0.8	1
0.7	1

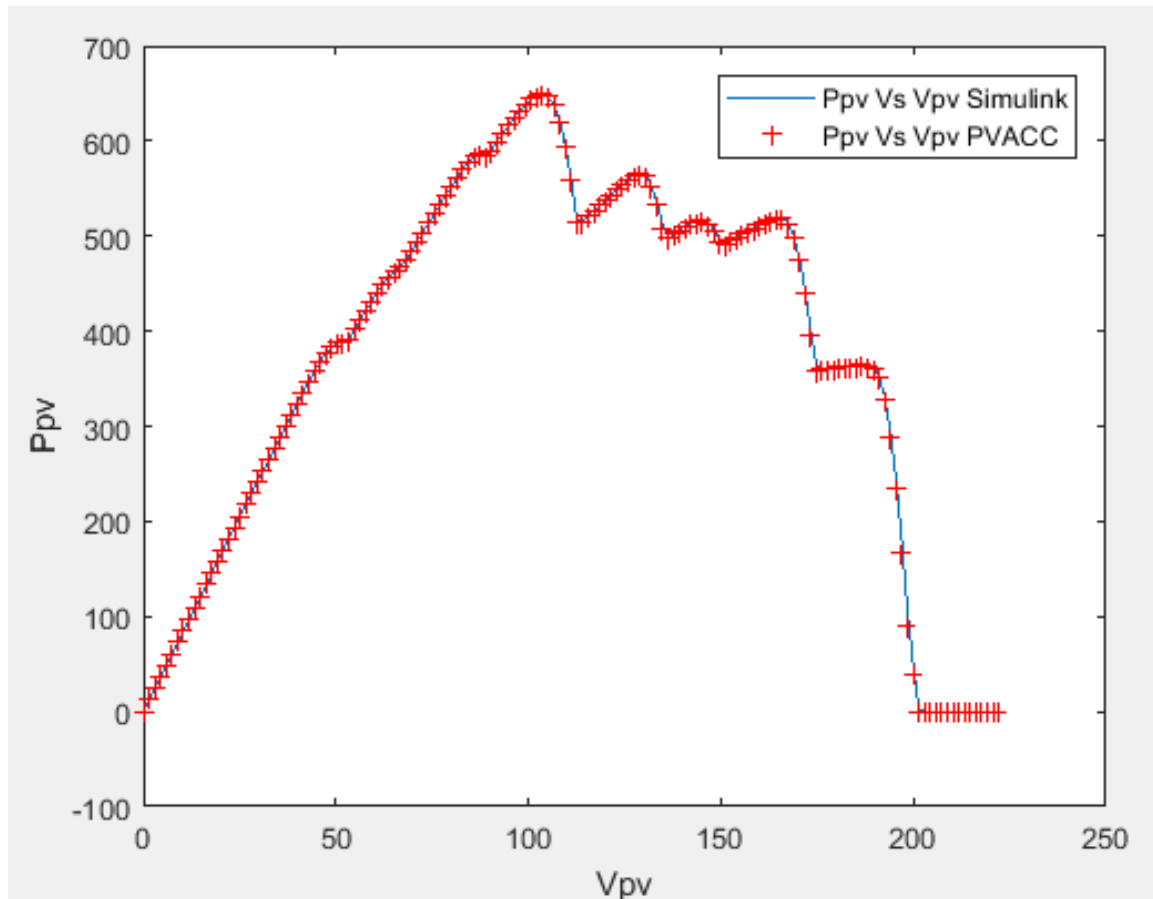
Dichos datos mostrados con anterioridad se definieron de igual manera para Simulink, en donde se halló las salidas de tensión (V\_Circuit) y de corriente (I\_Circuit) guardadas en un archivo en Excel, que genera el arreglo fotovoltaico bajo dichas condiciones de irradiancia y temperatura.

A continuación, se presentan las curvas características Corriente/Tensión (Figura 23) y Potencia/Tensión (Figura 24) del arreglo serie paralelo de tamaño 10x2, generadas bajo condiciones de sombreado parcial en Simulink (color azul) y del software PVACC (color rojo); observando una respuesta satisfactoria del software, ya que se deduce que este cumple con los requisitos para calcular y mostrar las potencias que se genera bajo cualquier condición en el que se encuentre expuesto.

Figura 23. Curva característica Corriente / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 10X2.



**Figura 24. Curva característica Potencia / Tensión para la prueba con un arreglo PV de tamaño 10X2.**



El cálculo del error porcentual es hallado en la ecuación 32, la cual se halla a partir del valor teórico extraído de Simulink quien guarda en un archivo .xls (Excel 2016) la corriente de salida  $I_{pv}$ , junto con los datos extraídos del software PVACC como dato experimental, el cual guarda en un archivo .txt los valores de la corriente ( $I_{pv}$ ) que se genera en el arreglo que se trabaja en ese momento. Los datos obtenidos de cada lenguaje de programación se encuentran en el anexo K.

$$E\% = \frac{|Valor\ teórico - Valor\ experimental|}{Valor\ teórico} \times 100\% \quad (32)$$

Una vez reemplazados los datos para llevarse a cabo la verificación del correcto funcionamiento de la herramienta desarrollada en este proyecto, se comprueba en la ecuación 33 que dicha aplicación da una solución óptima y confiable para generar las curvas características Corriente/Tensión y Potencia/Tensión de un arreglo fotovoltaico bajo condiciones de sombreado parcial.

$$E\%Total = \frac{\sum E\%}{Numero\ de\ muestras} = \frac{15,61817616}{150}$$

$$E\%Total = 0.1041\% \quad (33)$$

De la misma manera se calcula el error para la curva Potencia / Tensión, mostrando las tablas usadas en el anexo L y en la ecuación 34 se puede ver el resultado.

$$E\%Total = \frac{\sum E\%}{Numero\ de\ muestras} = \frac{15,6182}{150}$$

$$E\%Total = 0.1041\% \quad (34)$$

Concluyendo así, que la herramienta software PVACC da un resultado satisfactorio tanto para arreglos PV de tamaños pequeños y grandes.

## 6. CONCLUSIONES

- Al finalizar el proyecto se puede decir que se cumplió con el objetivo general llegando así a obtener una herramienta software fácil de usar, capaz de generar las curvas características Corriente / Tensión y Potencia / Tensión de arreglos fotovoltaicos pequeños con errores iguales a 0,1186 % e iguales a 0,1186 % respectivamente y de arreglos PV grandes con errores iguales a 0,1041 % para la curva Corriente/ Tensión y de 0,1041 % para la curva Potencia/ Tensión.
- Se logró implementar el modelo matemático en Python para arreglos PV de tamaños pequeños y grandes, además de implementar una interfaz gráfica de usuario logrando el fácil manejo de interacción entre ventanas y gráficas.
- Durante el trabajo se tuvieron varias dificultades, por eso sería adecuado que se dieran los elementos básicos para el uso de Python dentro de la carrera, siendo este, un software libre que permite un mayor desarrollo sin restricciones para el estudiante.

## 7. RECOMENDACIONES

- La herramienta es una primera versión y tiene varios aspectos que se pueden mejorar, por ejemplo:
  - ✓ Mostrar las coordenadas en las curvas.
  - ✓ Lograr unir las ventanas como una sola.
  - ✓ Agregar más opciones de herramientas para el usuario en la pestaña "Archivo".
  - ✓ Lograr aumentar el tamaño de la matriz para generar arreglos más grandes ya que nuestro software permite máximo arreglo 10 X 10.
  - ✓ Añadir una opción para cargar bases de datos de paneles solares.
  - ✓ Crear el ejecutable de la herramienta software PVACC.
- En esta herramienta se implementó un arreglo Serie Paralelo, pero en la literatura existen más tipos de arreglos PV, por esta razón este software podría ser una base para otras configuraciones y así obtener una aplicación más robusta y completa para los usuarios.

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] G. S. J.D. Bastidas a,\*, E. Francoa, G. Petrone b, C.A. Ramos-Pajac, “A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed,” 2012.
- [2] “Data sheet SW 290 - 300 MONO SolarWORLD.” [Online]. Available: [https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2016/10/SolarWorld-SW290-300-Mono\\_EN.pdf](https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2016/10/SolarWorld-SW290-300-Mono_EN.pdf).
- [3] J. M. H. F. Luis Miguel Sanchez Brea, “Computación científica con Python para módulos de evaluación continua en asignaturas de ciencias aplicadas.,” 2013. [Online]. Available: [http://pendientedemigracion.ucm.es/info/aocg/python/modulos\\_cientificos/numpy/index.html](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/aocg/python/modulos_cientificos/numpy/index.html).
- [4] “Solar Electricity Basics.” [Online]. Available: [http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar\\_electricity/basics/](http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/).
- [5] “Manufacturedtechnologies.” [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/85860/2-626-fall-2008/contents/?sequence=210>.
- [6] J. M. E.-A. Eduardo Huerta Mascotte\*, Ruth Ivonne Mata Chávez\* and R. A. L. M. Juan Manuel Sierra Hernández\*, Igor Guryev\*, “Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar,” 2016.

- [7] M. A. Alvarez, "Qué es Python," *desarrollo web.com*, 2003. [Online]. Available: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>.
- [8] J. W. Shipman, *Tkinter 8.5 reference: a GUI for Python*. New Mexico Tech, 2013.
- [9] "TkInter," *PacktPublishing*, 2016. [Online]. Available: <https://wiki.python.org/moin/TkInter>.
- [10] "NumPy," *Copyright*, 2005. [Online]. Available: <http://www.numpy.org>.
- [11] M. Shokeen, "Módulos matemáticos en Python: Math y Cmath," *Programacion.net*. [Online]. Available: [http://programacion.net/articulo/modulos\\_matematicos\\_en\\_python\\_math\\_y\\_cmath\\_1750](http://programacion.net/articulo/modulos_matematicos_en_python_math_y_cmath_1750).
- [12] B. estandar de Python, "Inspect live objects."
- [13] M. D. John Hunter, Darren Dale, Eric Firing, "matplotlib," *Copyright*, 2002. [Online]. Available: <https://matplotlib.org>.
- [14] "Python," *Copyright*, 2001. [Online]. Available: <https://www.python.org>.

## BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ M. A., “Qué es Python,” desarrollo web.com, 2003. [en línea].disponible en: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>.

BASTIDAS G. S. J.D. A,\*, FRANCOA E., PETRONE G. B, RAMOS-PAJAC C.A., “A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed,” 2012.

D SPACE “Manufactured technologies.” [en línea]. disponible en: <https://.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/85860/2-626-fall-2008/contents/?sequence=210>.

ESTANDAR DE PYTHON B., “Inspect live objects.”

FSEC “Solar Electricity Basics.” [en línea]. disponible en: [http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar\\_electricity/basics/](http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/).

HUERTA MASCOTTE Eduardo, MATA CHÁVEZ Ruth Ivonne and SIERRA HERNÁNDEZ Juan Manuel, GURYEV Igor, “Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar,” 2016.

JOHN HUNTER M. D., Darren Dale, Eric Firing, “matplotlib,” Copyright, 2002. [en línea].disponible en:<https://matplotlib.org>.

NUMPY Copyright, 2005. [en línea].disponible en:<http://www.numpy.org>.

PYTHON Copyright, 2001. [en línea].disponible en:<https://www.python.org>.

SANCHEZ BREA Luis Miguel, "Computación científica con Python para módulos de evaluación continua en asignaturas de ciencias aplicadas.," 2013. [en línea]. disponible en: [http://pendientedemigracion.ucm.es/info/aocg/python/modulos\\_cientificos/numpy/index.html](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/aocg/python/modulos_cientificos/numpy/index.html).

SFE-SOLAR "Data sheet SW 290 - 300 MONO SolarWORLD." [en línea]. disponible en: [https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2016/10/SolarWorld-SW290-300-Mono\\_EN.pdf](https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2016/10/SolarWorld-SW290-300-Mono_EN.pdf).

SHIPMAN J. W., Tkinter 8.5 reference: a GUI for Python. New Mexico Tech, 2013.

SHOKEEN M., "Módulos matemáticos en Python: Math y Cmath," Programacion.net. [en línea]. disponible en: [http://programacion.net/articulo/modulos\\_matematicos\\_en\\_python\\_math\\_y\\_cmath\\_1750](http://programacion.net/articulo/modulos_matematicos_en_python_math_y_cmath_1750).

TKINTER, PacktPublishing, 2016. [en línea]. disponible en: <https://wiki.python.org/moin/TkInter>.