

Estimación de los parámetros del diodo de baipás en un módulo fotovoltaico mediante
curvas corriente-tensión

Julián Ricardo Gómez Guerrero y Nicolás Alejandro Niño Fonseca

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingenieros Electricistas

Director

Carlos Rodrigo Correa Cely
Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Juan David Bastidas Rodríguez
Doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mi núcleo familiar conformado por mi mamá y hermanos, por ser mi guía en todo momento, por la motivación y el aliento que me brindan a diario que le da el impulso a mi vida. Los amare hoy y siempre.

A mis padrinos Óscar Fajardo Gómez y Fabiola Gómez, y a mis tíos Saúl Fajardo y Marcela Gómez, quienes me apoyaron incondicionalmente con el sueño de ser Ingeniero de la UIS, sin esperar nada a cambio, a ellos mil y mil gracias por brindarme esta oportunidad y permitirme labrar un mejor futuro. Los quiero con el alma.

A Nico mi compañero de tesis, por ser mi amigo leal en estos últimos años de Universidad, gracias por su infinita paciencia, por sus acertados consejos y por todo el entusiasmo que me transmitió en momentos oportunos, gracias por esa gran amistad, porque aprendí a verlo no solo como un amigo sino como un hermano.

Julián Ricardo Gómez Guerrero

A mi padre Armando Niño y a mi madre Alexandra Fonseca, gracias por su gran apoyo, soporte y guía incondicional, siempre dándome importantes consejos a lo largo de mi vida y en mi paso por la Universidad.

A mi hermano Augusto Niño, por preocuparse por mí y brindarme su apoyo incondicional.

Nicolás Alejandro Niño Fonseca

Agradecimientos

A la persona que nos brindó su ayuda desde el comienzo hasta el final, regalándonos muchas horas de su importante tiempo, estando preocupado y atento con cada una de nuestras dificultades académicas, quien nos enseñó a ser mejores personas todo en pro de ser excelentes ingenieros. A un buen profesor que tiene la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Gracias Ingeniero Luis Miguel Pérez Archila.

Tabla de Contenido

| | |
|---------------------------------------|----|
| Introducción | 11 |
| 1. Objetivos..... | 14 |
| 1.1 Objetivo General..... | 14 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 2. Estimación de los parámetros | 15 |
| 2.1 Marco Referencial | 15 |
| 2.1.1 Método..... | 18 |
| 2.1.2 Resultados | 24 |
| 2.1.2.1 <i>Discusión</i> | 27 |
| 3. Conclusiones..... | 47 |
| 4. Recomendaciones | 48 |
| Referencias Bibliográficas | 50 |
| Apéndices..... | 54 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 Criterios de parada para los tres algoritmos de optimización | 24 |
| Tabla 2 Estimación de los parámetros del diodo de baipás con cada uno de los filtros PSO..... | 29 |
| Tabla 3 Mejorando los criterios de parada en el algoritmo para la medida 1 de irradiancias altas con diferente punto inicial | 33 |
| Tabla 4 Estimación de los parámetros del diodo de baipás para el submódulo 1 mediante el algoritmo PSO con los 3 | 40 |
| Tabla 5 Estimación de los parámetros del diodo de baipás para el submódulo 1 mediante el algoritmo SOS con los 3 escenarios..... | 42 |
| Tabla 6 Desgaste en los diferentes diodos de baipás del módulo fotovoltaico..... | 45 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1 Curvas I-V del módulo fotovoltaico a diferentes niveles de irradiancia | 16 |
| Figura 2 Curvas I-V del módulo fotovoltaico a diferentes niveles de irradiancia con sombreados parciales | 17 |
| Figura 3 Diagrama de flujo del procedimiento propuesto | 21 |
| Figura 4 Montaje experimental..... | 25 |
| Figura 5 Curvas (I-V) del diodo de baipás del módulo fotovoltaico cambiando el tipo de filtro en el mismo escenario de irradiancias altas para el submódulo 3 mediante PSO | 28 |
| Figura 6 Curvas I-V del diodo de baipás, analizando el efecto que produce el filtro..... | 30 |
| Figura 7 Estimación de los parámetros del diodo de baipás para el submódulo 1 empleando el método de Trust Region..... | 31 |
| Figura 8 Curvas I-V del diodo de baipás, para irradiancias altas medida 1 con el método de Trust Region Dogleg variando su punto inicial..... | 32 |
| Figura 9 Resultados de los parámetros $I_{(sat,db)}$, η_{db} , RMSE y tiempo de cómputo con el método de PSO, para poder realizar el análisis estadístico..... | 34 |
| Figura 10 Distribución de probabilidad para el parámetro η del diodo de baipás del submódulo 1, con el algoritmo PSO con y sin filtrado en los datos | 35 |
| Figura 11 Resultados de los parámetros $I_{(sat,db)}$, η_{db} , RMSE y tiempo de cómputo con el método de SOS, para poder realizar el análisis estadístico..... | 37 |
| Figura 12 Distribución de probabilidad para el parámetro η del diodo de baipás del submódulo 1, con el algoritmo SOS con y sin filtrado en los datos | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 13 Comparación de los parámetros $I_{(sat,db)}$, η_{db} , RMSE y tiempo de computo de los dos métodos PSO y SOS, con 30 curvas para el submódulo 1..... | 38 |
| Figura 14 Resultados de los parámetros $I_{(sat,db)}$, η_{db} , RMSE y tiempo de cómputo con el método de PSO, para poder realizar el análisis estadístico con 10 muestras en cada escenario para el submódulo 1..... | 40 |
| Figura 10 Curvas (I-V) del diodo de baipás del módulo fotovoltaico para los tres escenarios | 41 |
| Figura 16 Comparación entre el método PSO y FSOLVE usando dos pares ordenados | 44 |

Lista de Apéndices

| | Pág. |
|--|-------------|
| Apéndice A. Especificaciones técnicas módulo solar..... | 54 |
| Apéndice B. Especificaciones técnicas Diodo de bypass | 56 |
| Apéndice C. Especificaciones técnicas BK precisión 8500..... | 60 |

Resumen

Título: Estimación de los parámetros del diodo de baipás en un módulo fotovoltaico mediante curvas corriente-tensión *

Autor: Julián Ricardo Gómez Guerrero y Nicolás Alejandro Niño Fonseca**

Palabras Clave: Generador fotovoltaico, Diodo de baipás, Estimación de parámetros, Método no invasivo, Mínimos cuadrados.

Descripción: En el presente trabajo se propone un procedimiento para estimar los parámetros ($I_{sat,db}$ y η_{db}) del modelo exponencial del diodo de baipás de un módulo fotovoltaico, a partir de las respectivas curvas experimentales de corriente-tensión a diferentes temperaturas e irradiancias. Se utilizaron dos curvas experimentales de (I-V), para obtener la curva (I-V) del diodo de baipás y a partir de esta curva se plantea un problema de ajuste de mínimos cuadrados empleando la ecuación del diodo de Shockley, logrando estimar los parámetros ($I_{sat,db}$ y η_{db}). Este problema de ajuste es solucionado con tres diferentes algoritmos de optimización, uno analítico y dos metaheurísticos. Además, la estimación de los parámetros se realizó para diferentes niveles de irradiancia y adicionando un proceso de filtrado sobre los datos experimentales. Los resultados encontrados muestran que los métodos propuestos proveen de buena precisión en la estimación de los parámetros ($I_{sat,db}$ y η_{db}) con el fin de realizar un diagnóstico del estado de los diodos de baipás.

El modelo descrito anteriormente se contrastó con datos tomados a partir de un montaje experimental, esto con el fin de comparar los parámetros obtenidos con los de referencia, en donde los parámetros de referencia fueran calculados a partir de datos que provee la hoja del fabricante del diodo GF3045T, que es el diodo instalado en el módulo fotovoltaico Trina TSM-270PD05V, que se encuentra compuesto por tres submódulos y está ubicado en la terraza oriental del Edificio Camilo Torres de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Juan David Bastidas Rodríguez. Doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Abstract

Title: Estimation of the by-pass diode parameters in a photovoltaic module using current-voltage curves*

Author: Julián Ricardo Gómez Guerrero and Nicolás Alejandro Niño Fonseca**

Key Words: Photovoltaic generator, Bypass diode, Parameter estimation, Non-invasive method, Least squares.

Description: In the present work, a procedure is proposed to estimate the parameters ($I_{sat,db}$ y η_{db}) of the exponential model of the by-pass diode of a photovoltaic module, from the respective experimental curves of current-voltage at different temperatures and irradiances. Two experimental curves of (I-V) were used to obtain the curve (I-V) of the by-pass diode and from this curve a least squares adjustment problem is posed using the Shockley diode equation, estimating the parameters ($I_{sat,db}$ y η_{db}). This adjustment problem is solved with three different optimization algorithms, one analytical and two metaheuristic. Furthermore, the estimation of the parameters was carried out for different levels of irradiance and adding a filtering process on the experimental data. The results found show that the proposed methods provide good precision in the estimation of the parameters ($I_{sat,db}$ y η_{db}) in order to diagnose the status of the by-pass diodes.

The model described above was contrasted with data taken from an experimental setup, this in order to compare the parameters obtained with the reference ones, where the reference parameters were calculated from data provided by the diode manufacturer's sheet. GF3045T, which is the diode installed in the Trina TSM-270PD05V photovoltaic module, which is made up of three sub-modules and is located on the eastern terrace of the Camilo Torres Building of the Industrial University of Santander (UIS).

* Degree Work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. Doctor in Chemical Engineering. Co-director: Juan David Bastidas Rodríguez. Doctor in Electrical and Electronic Engineering

Introducción

Actualmente, el planeta sufre una grave crisis energética y ambiental por causa de los combustibles fósiles, debido a que estos son recursos no renovables que tienden a consumirse rápidamente (Cengiz & Mamiş, 2015).

En vista de que este tipo de combustibles, causan un impacto ambiental negativo, se ha generado un gran interés por el uso de energías renovables como lo son: solar fotovoltaica, hidroeléctrica o eólica (Ghanshyam, Tejani, Savsani, & Vivek, 2016), ya que estas son fuentes de energía inagotables, que generan un menor impacto ambiental y mejoran tanto la calidad como la confiabilidad del sistema eléctrico.

De esta manera, la energía solar se constituye como una de las fuentes de energía renovable más importantes, por ello en la última década la producción de módulos fotovoltaicos (FV) ha aumentado, reduciendo sus precios de manera notable y haciéndolos asequibles en zonas en que es deficiente el servicio eléctrico o no existen interconexiones eléctricas (Archer & Hill, 2001).

Teniendo en cuenta lo anterior, el uso de la energía solar está innovando los mercados energéticos en el mundo, siendo en este momento países principales como: China, Japón y EE.UU., quienes lideran a nivel global los temas de transformación solar.

Partiendo de este punto, actualmente muchos gobiernos incentivan en sus territorios el uso de energías renovables por medio de la elaboración de políticas públicas destinadas al mejoramiento y calidad de matrices energéticas, tomando como una de las estrategias más comunes, la implementación de beneficios para el financiamiento de los sistemas FV, los cuales a menudo se pueden pagar por sí solos en un intervalo de 5 a 10 años (Archer & Hill, 2001).

Ahora bien, evidenciadas estas importantes situaciones a nivel global, se resalta la necesidad de proponer un procedimiento para estimar los parámetros ($I_{sat,db}$ y η_{db}) del modelo exponencial del diodo de baipás de un módulo fotovoltaico, a partir de las respectivas curvas experimentales de corriente-tensión a diferentes temperaturas e irradiancias, dado que, existen varios factores que provocan la degradación en los módulos FV como lo son las altas temperaturas, el polvo, el mal estado de los diodos, sombreados parciales, entre otros.

El sombreado parcial de sistemas FV se observa comúnmente en instalaciones con ambientes urbanos, donde existen objetos circundantes que generan sombras en la totalidad o en una parte del módulo fotovoltaico, fenómeno al que se le conoce como sombreado parcial, generando un impacto negativo sobre el desempeño del módulo, ya que en estas condiciones los módulos se polarizan en sentido inverso, lo que implica que funcionen como carga y no como generadores de energía, disipación que se debe a que los submódulos son forzados a trabajar en el segundo cuadrante trayendo consigo un aumento en la temperatura (Ghosh, Yadav, & Mukherjee, 2019).

En este punto dichos módulos pueden sufrir daños irreversibles debido a un fenómeno llamado puntos calientes, que ocurre cuando la tensión de polarización inversa supera la tensión de ruptura inversa de las células fotovoltaicas (Martínez, Muñoz, & Lorenzo, 2010), con el fin de contrarrestar esto, se coloca un diodo de derivación a través de cada submódulo llamado diodo de baipás. A su vez, estos diodos pueden llegar a degradarse con el tiempo y convertirse en una causa de falla en el funcionamiento del módulo, dado que, los diodos de baipás defectuosos a menudo se encuentran como el factor que conduce a la pérdida significativa de energía en los módulos solares (Humaid , Manish, & Rajesh, 2020).

Al indagar sobre este tema, fue posible encontrar que en Italia se desarrollo un procedimiento indirecto que permitio extraer los parámetros de las celdas fotovoltaicas sombreadas utilizando modelos generalmente ajustados para celdas irradiadas (Ciocia, y otros, 2020), pero este proyecto no se enfocaba en obtener los parámetros del diodo de baipás de su respectivo submódulo.

Ahora bien, en la Universidad Industrial de Santander (UIS) tambien se han desarrollado diversos trabajos relacionados con mecanismos para aumentar el rendimiento y la vida util de los sistemas fotovoltaicos, enfocandose en temas como el riego con agua en la superficie de un módulo (Florez Gomez & Rojas Zambrano, 2016), o de estructuras que permiten fijar la inclinación y altura del módulo (Hernández, Quintero, & Torres , 2016).

A nivel de posgrado, se encontro en particular un trabajo que realiza la estimación de los parámetros del diodo de baipás mediante una tecnica experimental y no invasiva (Vélez, 2019), esto con el fin de mejorar tanto el modelado de los generadores fotovoltaicos como incluso el diagnostico de fallas en los diodos a partir de la estimación de parámetros.

Dado el marcado interes en el tema y evidenciando los avances encontrados en los trabajos mencionados, con el apoyo del grupo de investigación CEMOS, se planeo llevar acabo el presente trabajo de grado, enfocado en la estimación de parámetros diodos de baipás, presentes en un módulo fotovoltaico, a partir de las respectivas curvas de corriente-tensión a diferentes temperaturas e irradiancias, e implementando algoritmos de optimización analíticos y metaheurísticos, destacando que para llevar a cabo la estimación, se utilizo el modelo shockley del diodo con el fin de representar cada uno de los diodos de baipás del módulo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Implementar un método de estimación de parámetros de los diodos de baipás en un módulo fotovoltaico a partir de las curvas de corriente-tensión.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar mediciones de las curvas corriente-tensión de un módulo fotovoltaico en diferentes condiciones de operación.
- Calcular las curvas corriente-tensión de los diodos de baipás a partir de las curvas corriente-tensión del módulo.
- Implementar y validar un método de estimación de parámetros de los diodos de baipás en Matlab utilizando las curvas corriente-tensión.

2. Estimación de los parámetros

2.1 Marco Referencial

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar (Lamigueiro, Colmenar, & Castro, 2012). Esta radiación es la energía que emite el sol en forma de ondas electromagnéticas y se encuentra formada por luz visible, rayos ultravioletas y rayos infrarrojos, los cuales pueden incidir dependiendo en el ángulo que golpee la tierra en radiación directa, difusa y reflejada. A esta cantidad de radiación solar por unidad de área se le denomina irradiancia, y su unidad de medida es Watt por metro cuadrado (W/m^2).

El módulo solar es el dispositivo que se distribuye comercialmente y consta de varios elementos, comenzando por la celda fotovoltaica, que se constituye como el elemento básico y esencial de cualquier instalación solar fotovoltaica.

Este tipo de instalaciones utilizan el efecto fotovoltaico, que es capaz de proporcionar energía mediante la captura y aprovechamiento de la luz a través de las celdas, convirtiéndola en electricidad (Pulli, Rozzi, & Bella, 2020). Las celdas se conectan en serie para obtener la suma de tensiones, conexión a la que se le llama submódulo, el cual viene con su respectivo diodo de baipás que reduce la disipación de potencia en un submódulo sombreado parcial o totalmente, dado que ofrece un camino por donde el excedente de la corriente pueda pasar sin forzarse a trabajar el submódulo en el segundo cuadrante de la curva (I-V), es decir, haciéndolo una carga.

Cabe resaltar que algunos módulos tienen dos o más submódulos conectados en serie, lo cual permite obtener una mayor tensión en terminales y alcanzar así los voltios necesarios tanto para el banco de baterías como para el regulador dimensionado para el sistema.

Curva Corriente – Tensión

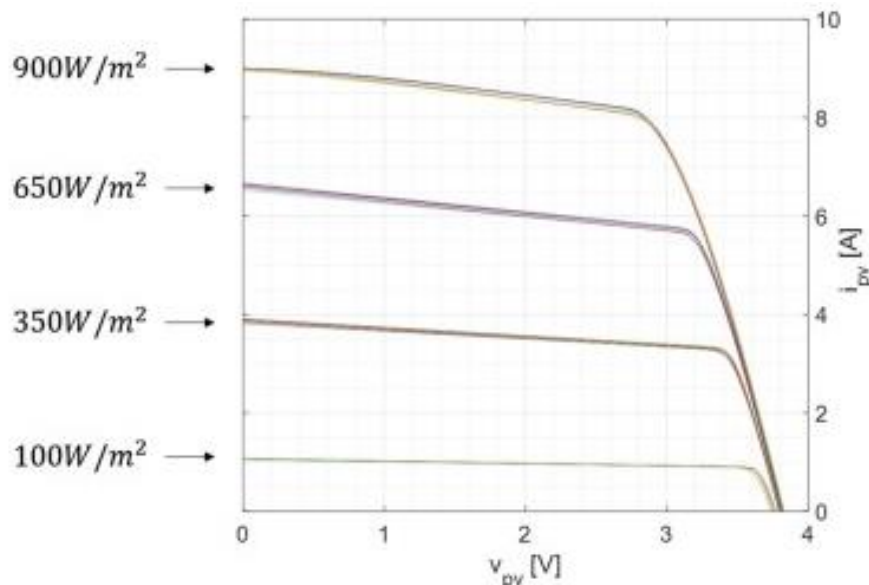
Llamada curva de corriente-tensión, es la representación gráfica de los valores medidos de corriente y tensión obtenidos experimentalmente de cualquier componente electrónico pasivos o activos.

La forma más rápida de determinar si un componente electrónico esta averiado es analizando su curva corriente-tensión ya que cada elemento como resistencia, condensador, diodo, entre otros, tienen un comportamiento que permite comparar con su tabla de fabricante y saber con propiedad si este está operando en óptimas condiciones o no. En este caso, para un módulo FV, la curva (I-V) se puede obtener, variando el voltaje de una carga electrónica conectada al módulo, desde el voltaje de circuito abierto hasta llegar al voltaje de cortocircuito y midiendo los respectivos valores de corriente.

Los resultados de esta curva son dependientes del nivel de irradiancia y la temperatura a la que se encuentre el submódulo, tal como se observa en la Figura 1.

Figura 1

Curvas I-V del módulo fotovoltaico a diferentes niveles de irradiancia



Nota: Figura tomada y modificada de “Towards non-destructive individual cell I-V characteristic curve extraction from photovoltaic module measurements” Solar Energy (Blakesley, y otros, 2020).

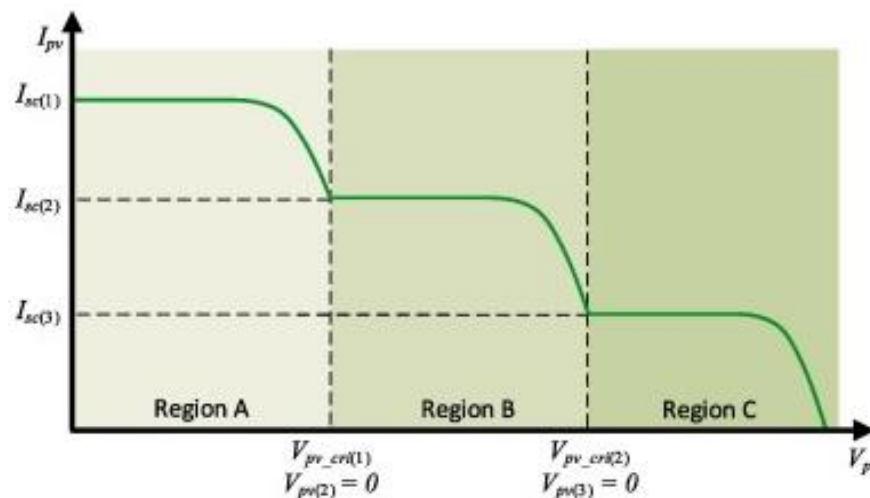
Sombreado Parcial

El sombreado parcial se produce cuando uno de los submódulos que componen el módulo fotovoltaico, recibe un nivel de irradiancia menor a los otros submódulos, fenómeno que puede ser causado por objetos circundantes como edificios, árboles, la aparición de nubes u objetos voladores, entre otros.

Este sombreado parcial cambia las curvas características corriente-tensión de las curvas estándar, como se muestra en la Figura 2, donde se observa un módulo con tres submódulos a diferente irradiancia.

Figura 2

Curvas I-V del módulo fotovoltaico a diferentes niveles de irradiancia con sombreados parciales



Nota: Figura tomada y modificada de “A simplified and fast computing photovoltaic model for string simulation under partial shading condition” Sustainable Energy Technologies and Assessments (Ayop, y otros, 2020).

Ecuación del diodo Shockley

Es el modelo exponencial más empleado para el estudio del diodo y sus aplicaciones, ya que la ecuación tiene una mejor aproximación del comportamiento del diodo de baipás debido a su nivel de complejidad en comparación con el modelo lineal por partes y el modelo ideal (Ocaya, 2014). La ecuación del diodo shockley no tiene en cuenta la resistencia del cuerpo del diodo y requiere de dos parámetros los cuales son la corriente de saturación inversa ($I_{sat,db}$) y el factor de idealidad (η_{db}), para poder caracterizar el diodo.

La ecuación que relaciona la intensidad de corriente y su tensión es:

$$I_{db} = I_{sat,db} \cdot \left(e^{\left(\frac{V}{\eta_{db} \cdot V_{t,db}} \right)} - 1 \right) \quad (1)$$

donde:

I_{db} =es la intensidad de corriente que atraviesa el diodo [A]

$I_{sat,db}$ =es la corriente de saturación inversa del diodo [A]

V =es la tensión en el diodo [V]

η_{db} = Factor de idealidad del diodo que varia en el proceso de fabricación o de su respectivo desgaste

$V_{t,db}$ =voltaje térmico del diodo [V]

2.1.1 Método

Se desarrolla el montaje experimental, bajo el siguiente método:

Se toma la primer curva corriente- tensión con todos los submódulos del módulo en igualdad de condiciones, es decir, con una radiación directa en todo el módulo, a esta curva la

llamaremos curva A, tanto esta curva como las demás mencionadas a continuación poseen la misma cantidad de puntos (100).

Además de esto, estarán aproximadamente en la misma irradiancia (igual valor de corriente en las curvas) y con un barrido de tensión en la carga que va desde corto circuito hasta circuito abierto.

En este barrido se obtienen los vectores $I_A (i)$ y $V_A (i)$ de la curva A, donde i va desde uno hasta cien. Después de guardar estos datos se procede a tapar completamente un submódulo, curva a la cual llamaremos B, siendo de ahí, de donde se obtienen los vectores $I_B (i)$ y $V_B (i)$.

Se procede a calcular e incorporar en las curvas $V_A (i)$ y $V_B (i)$ el efecto de la caída de tensión en los conductores que están conectados del módulo a la respectiva carga, esta resistencia del cable es aproximadamente $313,4 \text{ m}\Omega$, medición de caída de potencial que se puede predecir basándose en el conocimiento de las propiedades del material y su longitud (Bowler , Trung Thành, & Sacks, 2020), por ello se modifican los valores de estas curvas mediante las ecuaciones:

$$V_A (i) = V_A (i) + I_A (i) * 313,4 \text{ m}\Omega \quad (2)$$

$$V_B (i) = V_B (i) + I_B (i) * 313,4 \text{ m}\Omega \quad (3)$$

Estas curvas se pueden relacionar entre si debido a que tienen el mismo valor de irradiancia y, por ende, la misma cantidad de corriente eléctrica, lo que se puede evidenciar mediante la ecuación:

$$V_B (i) = V_A (i) \frac{Nm - 1}{Nm} - Vdb_{Nm} (i) \quad (4)$$

$$I_A (i) = I_B (i) \quad (5)$$

Donde Nm es la cantidad de submódulos que tiene el módulo y Vdb_{Nm} es la tensión del diodo de baipás deseado. La ecuación (4) se puede obtener debido a que las corrientes en ambas curvas son iguales, ya que los submódulos están en serie y parten de la misma irradiancia, lo que logra que el valor del voltaje de la curva B $V_B(i)$ se reduzca. Esto sucede por el submódulo sombreado, dado que este aporta un valor de 0 voltios a la suma de los otros dos submódulos del módulo.

Al encontrarse el submódulo sombreado se activará el diodo, logrando que por allí pase toda la corriente del módulo y por lo tanto se evidencie una caída de tensión en el mismo.

Para facilitar la comprensión de la ecuación (4) se hace necesario obtener una tercera curva analítica llamada curva C, que es la acotación en la tensión de la curva A mediante las ecuaciones:

$$V_C(i) = \frac{2}{3} * V_A(i) \quad (6)$$

$$I_C(i) = I_A(i) \quad (7)$$

Para terminar, colocando (6) en (4) y despejando, proceso con el cual se evidencia que al restar las tensiones $V_C(i)$ con $V_B(i)$ punto a punto se obtiene la tensión en el diodo de baipás y la corriente del diodo que sería igual a la curva C mostradas a continuación:

$$Vdb_{Nm}(i) = V_C(i) - V_B(i) \quad (8)$$

$$Idb_{Nm}(i) = I_C(i) \quad (9)$$

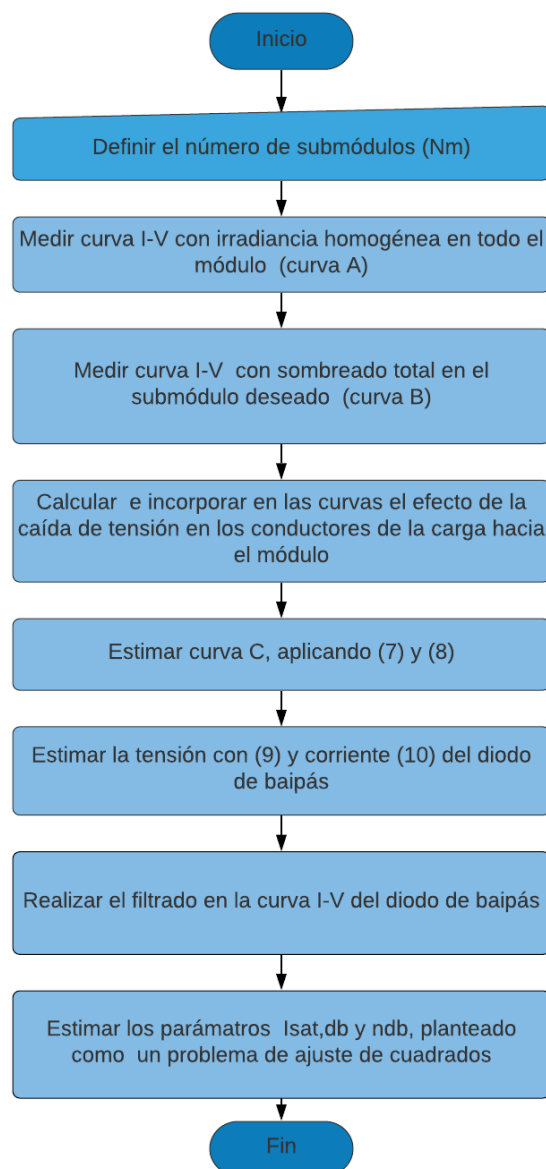
Con este procedimiento se obtienen las curvas I-V del diodo de baipás dándole cumplimiento al segundo objetivo específico. Al obtener los parámetros mencionados anteriormente, se procede a utilizar un método numérico para ajustar estas curvas y de esta manera

poder analizar correctamente las muestras experimentales, eliminando datos atípicos, y, por último, incorporando un filtro para suavizar el ruido que traen los datos, esto con el fin de obtener un resultado más limpio y preciso.

Para mayor comprensión de los pasos a seguir para la obtención de los parámetros del diodo, en la Figura 3 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento propuesto:

Figura 3

Diagrama de flujo del procedimiento propuesto



Procedimiento de Parametrización

Los parámetros ($I_{sat,db}$ y η_{db}) se pueden calcular utilizando diferentes procedimientos disponibles en la literatura, algunos consideran que todos los parámetros varían con la irradiación y la temperatura (De Soto, Klein, & Beckman, 2006).

Otros teóricos, realizan simplificaciones para obtener un sistema de ecuaciones no lineales (Accarino, Petrone, & Ramos, 2013), que es resuelto en los puntos operativos proporcionados en la hoja de datos del fabricante para obtener los parámetros del modelo (Sera, Teodorescu, & Rodriguez, 2007), siendo en este punto relevante aclarar que estos métodos no funcionan si el módulo fotovoltaico ya lleva un desgaste prologando a causa de años de uso, como sucedió en este caso, por ello fue necesario realizar pruebas experimentales con el fin de ver la degradación del módulo fotovoltaico.

Sobre las variaciones de los parámetros del factor de idealidad y corriente de saturación inversa es necesario tener claridad en que estos se hacen mediante los rangos aproximados de los valores de parámetros de cada submódulo, lo que se usa para reducir la variabilidad de las respuestas para una determinada irradiancia y temperatura (Chan & Phang, 1987).

Los valores de los parámetros se encuentran en diferentes rangos $I_{sat,db}$, miliamperios a nano amperios y η_{db} , en un valor adimensional mayor, por lo tanto, el sistema es no lineal y mal acondicionado, para lo cual se deben colocar unos límites que son el resultado de restricciones físicas en el circuito eléctrico (Hacke, 2013), así, el factor de idealidad η_{db} puede ir desde uno, sin embargo, con desgaste es posible llegar hasta cuatro en algunos casos, por ello con el fin de proporcionar un rango amplio se tomó desde cinco, es decir, se escogió desde 0,5 a 5 (Bastidas, Petrone, & Ramos, 2017).

En corrientes de saturación de una celda típica tiene un área de cientos de cm^2 por lo que un rango factible sería entre 10×10^{-8} y 10^{-4} (Hovel, 1975).

Parámetros para los algoritmos de optimización

Trust Region. Es un algoritmo analítico de un único agente de búsqueda que emplea un modelo cuadrático aproximado de la función objetivo. El algoritmo realiza una combinación entre el paso de Cauchy, un paso en la dirección de mayor descenso, y el paso de Gauss-Newton para la función objetivo. Los parámetros para este algoritmo dependen de las derivadas de la función objetivo en cada iteración y los detalles del procedimiento.

PSO. Este es un algoritmo metaheurístico de tipo enjambre, basado en dos componentes principales: el primero es la autoexploración de cada partícula y el segundo es un componente de exploración social, al cual aportan todas las partículas pertenecientes al enjambre.

Para este proyecto se empleó el algoritmo preinstalado en la Toolbox de optimización de Matlab, definiendo los siguientes parámetros:

- Tamaño del enjambre: 3000
- Coeficiente de autoajuste: 1.49
- Coeficiente de ajuste social: 1.49
- Rango del coeficiente de inercia: [0.1-1.1]

SOS. Es un algoritmo metaheurístico robusto tipo enjambre, el cual simula las interacciones simbióticas entre seres vivos de un mismo nicho ecológico. Este algoritmo cuenta con tres diferentes fases, cada una con una interacción entre partículas diferente a las demás (Ezugwu & Prayogo, 2019).

Los parámetros para este algoritmo son:

- Numero de organismo en el ecosistema (*ecosize*): 3000
- BF1 y BF2, los cuales son números aleatorios entre 1 y 2.

Criterios de Parada

Los criterios de parada para los tres algoritmos anteriormente descritos son presentados en la siguiente tabla:

Tabla 1

Criterios de parada para los tres algoritmos de optimización

| | Trust Region | PSO | SOS |
|--|-------------------------|---------------------|---------------------|
| Tolerancia en la función objetivo | 1×10^{-6} | 1×10^{-40} | 1×10^{-40} |
| Tolerancia en el paso del agente de búsqueda | 1×10^{-6} | <i>N\A</i> | <i>N\A</i> |
| Máximo número de iteraciones | 400 | 1000 | <i>N\A</i> |
| Máximo número de iteraciones estáticas | <i>N\A</i> | 40 | 50 |
| Máximo número de evaluaciones de la función objetivo | 200 | <i>N\A</i> | 1×10^{18} |

2.1.2 Resultados

Expuesto el método para estimar los parámetros del diodo de baipás, en esta sección se va a presentar la validación experimental del método cuando existe sombreado total en uno de los submódulos del módulo.

Descripción del Montaje Experimental

Para efectuar la validación experimental, se realizó el montaje evidenciado en la Figura 4.

Figura 4

Montaje experimental



Nota: Montaje experimental correspondiente al desarrollo de proyecto.

El montaje está conformado por un módulo trina solar TSM-PD05 270W, un computador con el software Matlab, una carga electrónica programable BK precisión 8500, una cubierta de madera para cubrir totalmente cada uno de los tres submódulos del módulo, un piranómetro marca apogee instruments conectado a un multímetro fluke electronics 117 y una termocupla tipo k marca sparkFun electronics conectada a una pinza amperimétrica AMP-320 beha-Amprobe.

Se conectó la carga por medio de un par de cables AWG-12, luego se conectó la carga electrónica al computador por medio de un cable tipo USB, el computador utilizó un código con propiedad intelectual del grupo CEMOS que fue modificado por los investigadores mediante el programa MATLAB. La carga incorporó un convertidor RS232 a USB, la comunicación serial se

configuro a 9600 baudios por segundo, con el fin de intercambiar información entre la carga y la computadora y así obtener la curva I-V del módulo, realizando un barrido en tensión.

Por otra parte, además de la configuración en la comunicación serial se tomaron en cuenta los tiempos necesarios para medir la curva A y también al momento de incluir la sombra para medir la curva B. La secuencia para obtener los datos fue aproximadamente de 40 segundos, diferenciada en los siguientes pasos:

- Tomar la curva A con 100 puntos utilizando el código mencionado anteriormente en Matlab para la obtención de la curva I-V, tarda 18 segundos.
- Sombrear el submódulo del que se desea obtener los parámetros del diodo de baipás, tarda alrededor de 4 segundos.
- Tomar la curva B realizando nuevamente el barrido en tensión con 100 puntos para obtener la curva I-V, tarda 18 segundos.

Teniendo en cuenta que las condiciones climáticas deben ser optimas, es decir, existencia de poca nubosidad e irradiancia constante, se dio una espera de 40 segundos, los suficientes para tomar las curvas y registrar los datos de irradiancia y temperatura ambiente por medio del piranómetro y la termocupla mencionados anteriormente, adicionalmente a esto, para descartar las curvas que presentaran grandes variaciones en el nivel de irradiancia, se descartaron curvas que tuvieran una variación mayor a 3 mV en la tensión que marco el piranómetro, equivalentes a un rango de irradiancia de $15 \frac{W}{m^2}$ entre las curvas A y B, lo que también se corrobora por las diferencias en las corrientes de corto circuito de las curvas (I-V) obtenidas.

Este montaje se desarrolló en repetidas ocasiones a diferentes horas del día, variando la irradiancia y el submódulo trabajado, acción que se realizó hasta que fuese posible obtener un

banco de más de 400 curvas, sin embargo, solo se procesaron 90 curvas que cumplieran con las condiciones descritas anteriormente para el experimento, es decir, temperatura ambiente e irradiancia constantes con el fin de analizar a fondo el comportamiento del método propuesto, logrando darle validez al primer objetivo específico.

2.1.2.1 Discusión

El muestreo es la forma científica para darle validez a los resultados de una población, por ello, la muestra debe ser significativa, ya que si la muestra está distribuida normalmente, entonces se puede utilizar cualquier cantidad de muestras, razón por la cual, en este caso de estudio, se debe partir de que no se sabía cuál sería el comportamiento de estas, por ello se optó por contar con al menos 30 elementos para observar, ya que la mayor parte de los estadísticos consideran que una buena aproximación a la distribución para muestras es de 30, debido que esta es una cantidad lo suficientemente robusta para que se puedan validar datos (Johnson, Richard, Arnold, Miller, & Freund's , 2018).

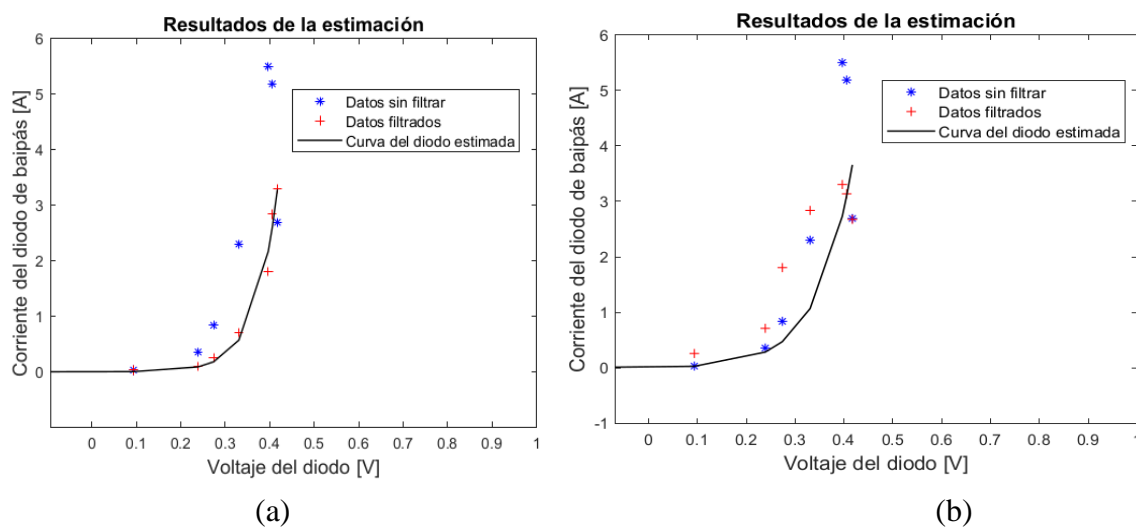
Se realizó un análisis estadístico para los diferentes métodos propuestos a continuación en la elaboración del proyecto, para lo cual se realizó un estudio con las mismas 90 curvas del módulo, es decir, para cada submódulo se trabajó con una cantidad de 30 curvas procesadas, con el fin de ver cual tiene mejores resultados comparándolos entre sí.

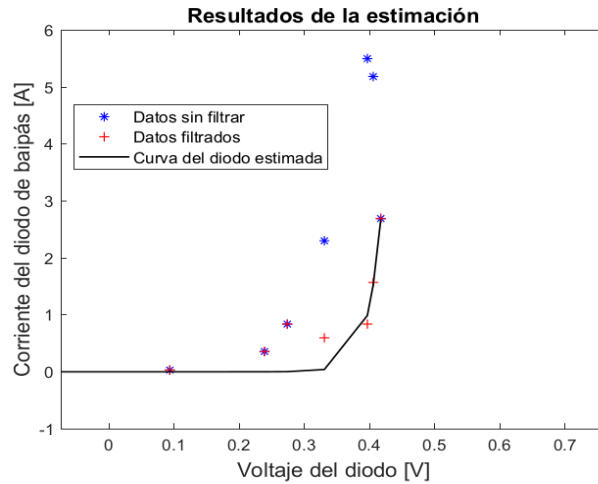
Adicionalmente, para el desarrollo de este proyecto se consideró el uso de tres diferentes métodos de optimización para el ajuste de curvas en el análisis de los datos experimentales, esto con el fin de analizar el desempeño de varios algoritmos, dándole así un cumplimiento sólido al objetivo general. Utilizando la ecuación del diodo shockley (1) para cada uno de los métodos propuestos a fin de, caracterizar el diodo del cual se desea estimar los parámetros.

Es importante resaltar que se incorporó un filtro a los tres métodos propuestos para suavizar el ruido de los datos, en este proyecto se analizaron tres filtros (Media móvil, Mediana, Hampel) dada la búsqueda de obtener un resultado más limpio y preciso que se ajuste a nuestros datos, así, el filtro de media móvil y mediana se configura con una ventana de longitud de 5 datos y el filtro de hampel con una ventana de longitud de 8 datos a lo largo de la curva (I-V) obtenida para el diodo de baipás, calculando los promedios de los datos contenidos en la ventana, produciendo cambios lentos en los valores experimentales y obteniendo una tendencia más clara de la curva o señal, por ello las analizamos y comparamos para una misma curva I-V del diodo de baipás en los tres casos y de esta manera escoger el filtro con el que se trabajara los métodos propuestos.

Figura 5

Curvas I-V del diodo de baipás del módulo fotovoltaico cambiando el tipo de filtro en el mismo escenario de irradiancias altas para el submódulo 3 mediante PSO





(c)

En la Figura 5, (a) corresponde al filtro de media móvil, (b) al filtro de mediana y (c) al filtro de hampel.

A continuación, se muestran los resultados para la estimación de los parámetros del diodo para cada uno de los filtros de la Figura 5.

Tabla 2

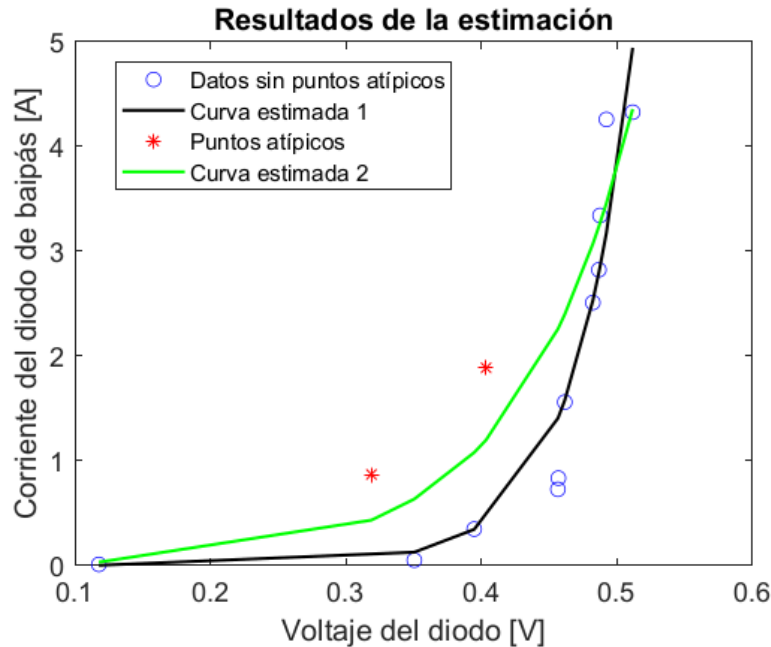
Estimación de los parámetros del diodo de baipás con cada uno de los filtros con PSO

| TIPO DE FILTRO | I_{sat} [μA] | η | RMSE [mA] |
|-----------------------|-----------------------|--------|------------------|
| Filtro de Media Móvil | 721,60 | 1,77 | 67,57 |
| Filtro de Mediana | $1,00 \times 10^4$ | 2,53 | 359,90 |
| Filtro Hampel | $4,72 \times 10^{-3}$ | 0,74 | 153,4 |

En Tabla 2 se observa que comparando los resultados que se obtuvo con cada uno de los 3 filtros el de menor error medio cuadrático RMSE fue el filtro de media móvil, es decir, que los puntos filtrados tienden a seguir el comportamiento de la curva estimada del diodo como se muestra en la Figura 5 por lo que se optó por escoger el filtro de media móvil para obtener la estimación de los parámetros del diodo de baipás con los métodos de Trust Region, PSO Y SOS.

Figura 6

Curvas I-V del diodo de baipás, analizando el efecto que produce el filtro



Para entender el efecto que causa un filtro en los datos se tomó una de las curvas tal, como se observa en la Figura 6, dos puntos anómalos lejanos a la tendencia de la curva (I-V) (en color rojo), que producen un cambio significativo en las curvas estimadas, al igual que en el valor de los parámetros estimados, ya que para la curva estimada 1, los parámetros obtenidos fueron de $\eta = 1,58$ y $I_{sat} = 44 \times 10^{-6}$ [A]. Mientras que para la curva estimada 2 son de $\eta = 3,01$ y $I_{sat} = 10 \times 10^{-3}$ [A], lo que evidencia cambios de 3 órdenes de magnitud en el valor de la corriente de saturación estimada.

Además, los parámetros estimados del diodo de baipás tienen un rango de estimación distinto, por lo que la corriente de saturación puede tomar valores entre $[10^{-15}, 10^{-2}]$ para darle un rango de estimación más amplio que el sugerido por (Hovel, 1975), mientras que el factor de idealidad tiene un rango de variación $[0,5,5]$. De acuerdo con estos rangos, la corriente de

saturación estimada puede presentar variaciones de varios ordenes de magnitud con pequeñas variaciones del factor de idealidad estimado o de los puntos sobre la curva (I-V) que se utilizan en la estimación de los parámetros.

Igualmente, se decidió el obtener los parámetros del diodo de baipás GF3045T $I_{sat,db}$ y η_{db} utilizando los valores típicos obtenidos en la hoja de datos de las especificaciones del módulo solar, es decir, por medio de unos valores de referencia, esto para poder comparar el diodo cuando tiene unas características de poco uso, contra uno que tiene años de desgaste tal como se encuentra actualmente.

Estos resultados se tomaron del trabajo de posgrado (Vélez, 2019), ya que se utilizó el mismo módulo para ambos trabajos de investigación, $I_{sat,db} = 100 [\mu A]$ y $\eta_{db} = 1,435$, estos parámetros se lograron gracias a los puntos que brinda el fabricante los cuales se ubican a una temperatura estándar de 25 grados centígrados con una corriente de 25 [A] y 0,45 [V] y el otro punto en 30 [A] y 0,5 [V] a igual temperatura.

- ***Método 1. TRUST REGION (Región de confianza)***

Este método utiliza un algoritmo con un único agente de búsqueda, necesitando de un punto inicial y mostrando como inconveniente que se detenga en un mínimo local. Si el problema planteado tiene muchos mínimos locales, este dependerá de su valor inicial, evidenciando variaciones en su respuesta sin encontrar el óptimo global.

Figura 7

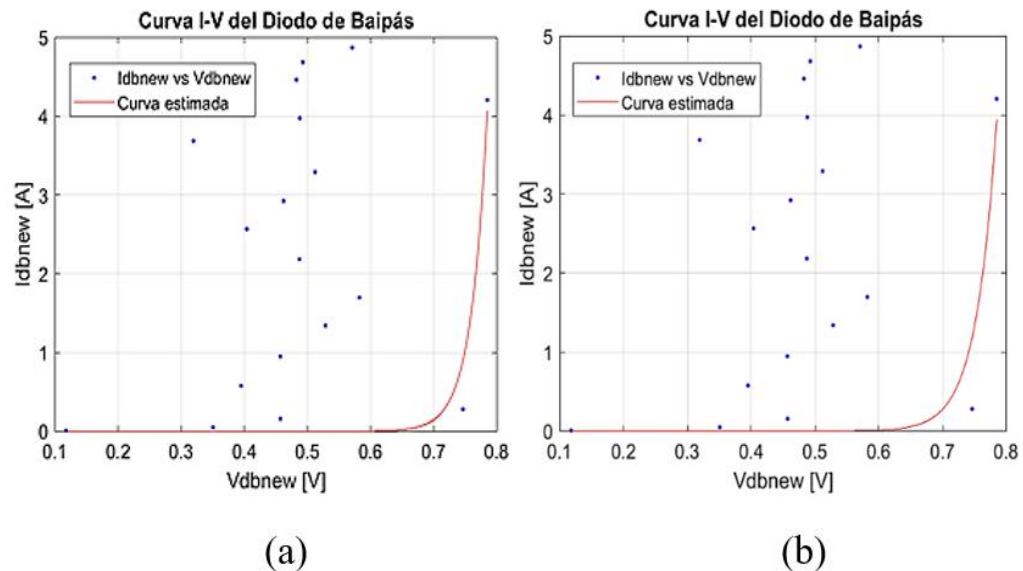
Estimación de los parámetros del diodo de baipás para el submódulo 1 empleando el método de Trust Region

| SUBMÓDULO 1 | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|--------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------|--------------------|-----------------------|------------|
| Punto Inicial | IRRADIANCIAS BAJAS | | | IRRADIANCIAS MEDIAS | | | IRRADIANCIAS ALTAS | | |
| | Medida | Isat Estimada [pA] | n Estimado | Medida | Isat Estimada [pA] | n Estimado | Medida | Isat Estimada [pA] | n Estimado |
| (0,1576 ; 1,2170) | 1 | 816,30 | 1,22 | 1 | 68,98 | 1,22 | 1 | 84,27 | 1,22 |
| (0,1576 ; 0,9705) | | 4,59 | 0,97 | | 0,14 | 0,97 | | 0,17 | 0,97 |
| (0,1576 ; 1,2170) | 2 | 124,40 | 1,22 | 2 | 3,98 | 1,22 | 2 | 3,82 | 1,22 |
| (0,1576 ; 0,9705) | | 0,33 | 0,97 | | $4,29 \times 10^{-3}$ | 0,97 | | $3,35 \times 10^{-3}$ | 0,97 |

Como es posible observar en todas las medidas, los parámetros estimados del diodo de baipás dependen de su valor inicial, es decir, no se logrará saber con exactitud si los valores encontrados son correctos o no.

Figura 8

Curvas I-V del diodo de baipás, para irradiancias altas medida 1 con el método de Trust Region variando su punto inicial



Ahora bien, como es posible apreciar en la Figura 8, que corresponden a la medida 1 en Irradiancias altas (a) y (b) son los respectivos puntos iniciales, el algoritmo se detiene en un mínimo local y la estimación de la curva está muy alejada de los puntos por lo cual el cálculo de los parámetros se aleja de los valores estimados y existe una variación en los resultados como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 3

Mejorando los criterios de parada en el algoritmo para la medida 1 de irradiancias altas con diferente punto inicial

| IRRADIANCIAS ALTAS | | | |
|-------------------------------|--------|------------------------|--------|
| PUNTO INICIAL | MEDIDA | I_{sat} [A] | η |
| $(1,00 \times 10^{-4}; 0,16)$ | | $1,55 \times 10^{-61}$ | 0,16 |
| $(1,00 \times 10^{-6}; 1,00)$ | 1 | 2,04 | 22,81 |

A pesar del cambio en los criterios de parada mostrados en la Tabla 1 por unos más estrictos (máximo número de evaluaciones en 2000, máximo número de iteraciones en 4000 y una tolerancia de 1×10^{-40}), el algoritmo continuó mostrando un bajo desempeño en el ajuste de las curvas, ya que los parámetros estimados continúan dependiendo del punto inicial del algoritmo, tal como se muestra en la Tabla 3, razón por la cual se considera que el método no hace una estimación muy precisa.

- ***Método 2. P.S.O (Optimización por enjambre de partículas)***

La optimización de enjambre de partículas (PSO) es un algoritmo estocástico utilizado para los problemas de optimización propuestos por Kennedy en 1995 (Muhammad, Rathiah, & Noor, 2013), se constituye como una buena técnica para los problemas de optimización.

Este algoritmo está inspirado en el comportamiento del enjambre, como la bandada de pájaros y la formación de bancos de la naturaleza, por ello, el PSO se ha utilizado ampliamente en problemas de ingeniería.

Al ser un método con múltiples agentes de búsqueda, permitió dar una estimación muy buena de los parámetros en un tiempo de ejecución aceptable, además de esto, se aplicó un filtro de media móvil con el fin de eliminar el nivel de ruido que se presentara al momento de realizar la medición de las curvas A y B experimentalmente.

Figura 9

Resultados de los parámetros $I_{sat,db}$, η_{db} , RMSE y tiempo de cómputo con el método de PSO, para poder realizar el análisis estadístico.

| SUBMÓDULO 1 | | SUBMÓDULO 2 | | SUBMÓDULO 3 | | | |
|----------------------------------|-----------------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| | | PSO | | PSO | | PSO | |
| | | CON FILTRO | SIN FILTRO | CON FILTRO | SIN FILTRO | CON FILTRO | SIN FILTRO |
| I_{sat} [mA] | Media Geométrica | 4,29 X 10-3 | 5,01 | 0,19 | 3,20 | 0,34 | 4,97 |
| | Rango Intercuartílico | 0,35 | 7,43 | 1,59 | 5,99 | 1,25 | 4,34 |
| n | Media Aritmética | 1,74 | 2,76 | 1,87 | 2,52 | 1,84 | 2,53 |
| | Desviación Estándar | 0,41 | 0,41 | 0,49 | 0,67 | 0,37 | 0,64 |
| RMSE [mA] | Media Aritmética | 75,30 | 294,73 | 73,99 | 228,26 | 54,11 | 188,72 |
| | Desviación Estándar | 65,94 | 200,21 | 78,20 | 223,09 | 40,54 | 150,12 |
| Tiempo [s] | Media Aritmética | 87,15 | 56,12 | 61,85 | 46,71 | 76,25 | 49,61 |
| | Desviación Estándar | 51,77 | 32,97 | 33,25 | 29,51 | 38,25 | 19,77 |

Como es posible observar, en la Figura 10 se encuentra dividida por el número de submódulos que componen el módulo fotovoltaico, a partir de los resultados obtenidos en la estimación de parámetros de los diodos de baipás mediante (PSO) se procede a hacer un análisis estadístico, para $I_{sat,db}$, utilizando la media geométrica y el rango intercuartílico, ya que la corriente de saturación presenta valores atípicos, por lo cual, estas son poco sensibles a este tipo de datos, con lo cual arroja un mejor resultado.

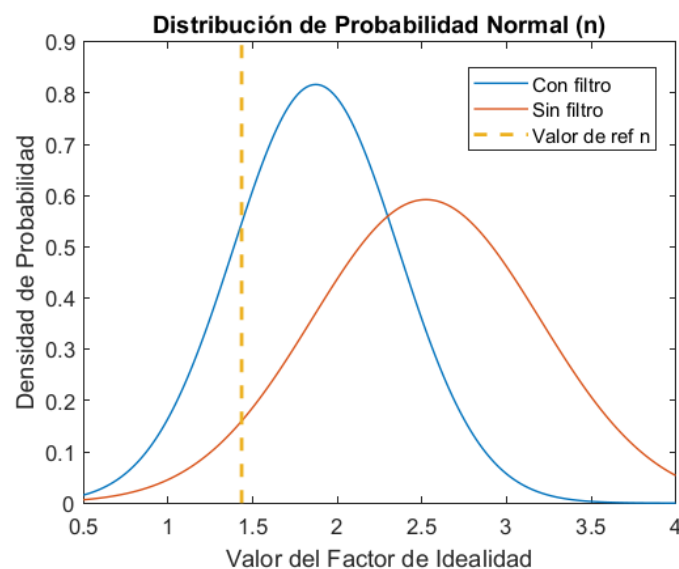
Para los demás parámetros que son factor de idealidad, error cuadrático medio (RMSE) y tiempo de cómputo del algoritmo, se tuvo en cuenta la media aritmética y la desviación estándar con el fin de poder realizar la distribución de probabilidad normal.

Para tratar de reducir errores en la estimación se realizó un análisis estadístico con 180 curvas tomadas experimentalmente, es decir, 90 muestras procesadas, esto con el fin de obtener las medidas de tendencia central de los parámetros estimados y su variación.

En el proceso de estimación, algunas graficas pueden arrojar valores extremos para los parámetros estimados, especialmente la corriente de saturación inversa. Sin embargo, para reducir este fenómeno se implementa una medida estadística como la media geométrica, la cual es menos sensible a valores extremos en comparación con la media aritmética. Al igual que para describir la variación de este parámetro se usó el rango intercuartílico.

Figura 10

Distribución de probabilidad para el parámetro η del diodo de baipás del submódulo 2, con el algoritmo PSO con y sin filtrado en los datos



Como podemos observar en la Figura 10, en los valores del factor de idealidad con el método de (PSO) con filtro, la media se encuentra más cercana al valor de referencia en comparación con el mismo algoritmo, pero sin el proceso de filtrado. Adicionalmente, también se incrementa la desviación estándar, lo que indica que con el proceso de filtrado se puede reducir la variación en la estimación de los parámetros, como se observa en la Figura 15 y en la Tabla 4.

- ***Método 3 S.O.S. (Algoritmo de búsqueda de organismos simbióticos)***

El algoritmo de búsqueda de organismos simbióticos (SOS) desarrollado en 2014, imita la relación simbiótica entre los seres vivos, como el mutualismo, el comensalismo y el parasitismo, para sobrevivir en el ecosistema, es decir, se basa en el comportamiento cooperativo entre organismos de la naturaleza donde necesita un tamaño de la población y el número máximo de evaluaciones de funciones para su funcionamiento (Cheng & Prayogo, 2014).

El algoritmo SOS ha sido examinado para problemas de ingeniería de referencia restringidos y no restringidos, demostrando tener un desempeño superior con otras metaheurísticas (Ghanshyam, Tejani, Savsani, & Vivek, 2016), razón por la cual se implementó en este trabajo de investigación.

Dado que este método es similar a PSO, cuenta también con múltiples agentes de búsqueda, lo cual permitió realizar una buena estimación de los parámetros del diodo de baipás siendo muy cercana a la estimación realizada con PSO, a excepción de que su tiempo de ejecución es muy alto comparado con SOS.

Para este método también se aplicó el filtro de media móvil con el fin de eliminar el ruido.

Figura 11

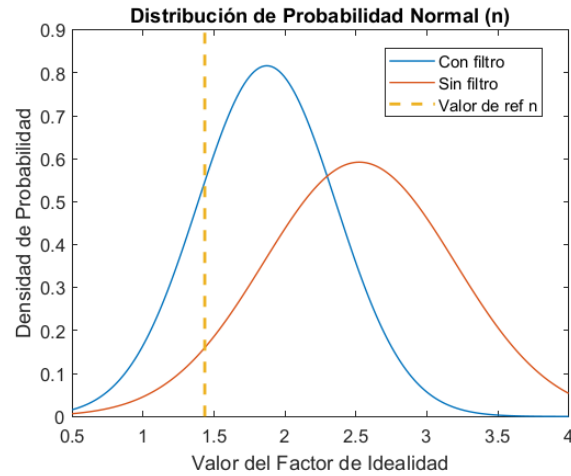
Resultados de los parámetros $I_{sat,db}$, η_{db} , RMSE y tiempo de cómputo con el método de SOS, para poder realizar el análisis estadístico

| SUBMÓDULO 1 | | SUBMÓDULO 2 | | SUBMÓDULO 3 | | | |
|-------------|-----------------------|--------------------------|------------|-------------|------------|--------|--------|
| | | SOS | | SOS | | | |
| | | CON FILTRO | SIN FILTRO | CON FILTRO | SIN FILTRO | | |
| Isat [mA] | Media Geométrica | 72,30 X 10 ⁻³ | 5,01 | 0,19 | 3,20 | 0,34 | 4,97 |
| | Rango Intercuartílico | 0,35 | 7,43 | 1,59 | 5,99 | 1,25 | 4,34 |
| n | Media Aritmética | 1,74 | 2,76 | 1,87 | 2,52 | 1,84 | 2,53 |
| | Desviación Estándar | 0,41 | 0,41 | 0,49 | 0,67 | 0,37 | 0,64 |
| RMSE [mA] | Media Aritmética | 75,28 | 294,67 | 73,98 | 228,29 | 54,09 | 188,74 |
| | Desviación Estándar | 65,93 | 200,18 | 78,20 | 223,15 | 40,53 | 150,21 |
| Tiempo [s] | Media Aritmética | 438,55 | 385,99 | 489,89 | 451,86 | 598,09 | 479,07 |
| | Desviación Estándar | 213,78 | 206,19 | 210,51 | 270,75 | 233,82 | 230,95 |

La Figura 10, se encuentra dividida por el número de submódulos que componen el módulo fotovoltaico. A partir de los resultados obtenidos en la estimación de parámetros de los diodos de baipás mediante (SOS), se procede a hacer un análisis estadístico, para $I_{sat,db}$, utilizando la media geométrica y el rango intercuartílico, ya que la corriente de saturación presenta valores atípicos, por lo cual estas son poco sensibles a este tipo de datos, dando un mejor resultado. Para los demás parámetros que son factor de idealidad, error cuadrático medio (RMSE) y tiempo de cómputo del algoritmo, se tomaron en cuenta la media aritmética y la desviación estándar, con el fin de poder realizar la distribución de probabilidad normal.

Figura 12

Distribución de probabilidad para el parámetro η del diodo de baipás del submódulo 2, con el algoritmo SOS con y sin filtrado en los datos.



Como podemos observar en la Figura 12, se evidencia que los valores del factor de idealidad mediante el método SOS con filtro, son los que están más cercanos al valor de referencia del factor de idealidad. Calculado a partir de la hoja de datos del fabricante del diodo GF3045T, podemos notar una gran similitud con la Figura 10, ya que la estimación de parámetros de los diodos de baipás para ambos métodos, arrojan resultados muy cercanos.

- *Comparación de los parámetros entre los algoritmos PSO y SOS*

Figura 13

Comparación de los parámetros $I_{sat,db}$, η_{db} , RMSE y tiempo de computo de los dos métodos PSO y SOS, con 30 curvas para el submódulo 1.

| SUBMÓDULO 1 | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | | PSO | | SOS | |
| | | CON FILTRO | SIN FILTRO | CON FILTRO | SIN FILTRO |
| Isat [mA] | Media Geométrica | 72,30 X 10-3 | 5,01 | 72,30 X 10-3 | 5,01 |
| | Rango Intercuartílico | 0,35 | 7,43 | 0,35 | 7,43 |
| n | Media Aritmética | 1,74 | 2,76 | 1,74 | 2,76 |
| | Desviación Estándar | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 |
| RMSE [mA] | Media Aritmética | 75,30 | 294,73 | 75,28 | 294,67 |
| | Desviación Estándar | 65,94 | 200,21 | 65,93 | 200,18 |
| Tiempo [s] | Media Aritmética | 87,15 | 56,12 | 438,55 | 385,99 |
| | Desviación Estándar | 51,77 | 32,97 | 213,78 | 206,19 |

Para la Figura 10, es suficiente con mostrar la comparación para el submódulo 1, entre $I_{sat,db}$, η_{db} , RMSE y el tiempo de cómputo para PSO y SOS con y sin filtro, dado que, como podemos apreciar se observa una gran diferencia en los tiempos de cómputo entre los dos métodos, obteniendo que la mejor opción para utilizar es el algoritmo de PSO, evidenciando que este es más eficiente debido a que el tiempo de cómputo es mucho menor en comparación con SOS.

Por ello es importante resaltar la implementación de SOS, ya que verifico que el punto que están encontrando los dos algoritmos es el mismo, es decir, el óptimo global, dando como resultado una excelente estimación de parámetros del diodo de baipás para cada submódulo que compone el módulo y así darle cumplimiento al tercer objetivo específico.

4.2.1 Efecto del nivel de irradiancia en la estimación de los parámetros.

Para estimar los parámetros del diodo de baipás se consideraron los siguientes 3 escenarios:

- Escenario 1: (Irradiancias bajas): En el primer escenario se consideró que los submódulos se encontraran en un rango de irradiancia baja, es decir, una irradiancia entre 0 y $300 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Se realizó el procedimiento propuesto en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3, para estimar los parámetros del diodo de baipás con PSO y SOS.

- Escenario 2: (Irradiancias Medias): En el segundo escenario se consideró que los submódulos se encontraran en un rango de irradiancia media de $300 < G < 600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Se realizó el procedimiento propuesto en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3, para estimar los parámetros del diodo de baipás con PSO y SOS.

- Escenario 3: (Irradiancias Altas): En el tercer escenario se consideró que los submódulos se encontraran en un rango de irradiancia alta de $G > 600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Se realizó el procedimiento propuesto en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3, para estimar los parámetros del diodo de baipás con PSO y SOS.

A continuación, se muestran los resultados estimados para cada escenario propuesto:

Figura 14

Resultados de los parámetros $I_{sat,db}$, η_{db} , RMSE y tiempo de cómputo con el método de PSO, para poder realizar el análisis estadístico con 10 muestras en cada escenario para el submódulo 1

| SUBMÓDULO 1 | | SUBMÓDULO 1 | | SUBMÓDULO 1 | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------|------------|---------------------|------------|--------------------|------------|
| | | Irradiancias Bajas | | Irradiancias Medias | | Irradiancias Altas | |
| | | CON FILTRO | SIN FILTRO | CON FILTRO | SIN FILTRO | CON FILTRO | SIN FILTRO |
| Isat [mA] | Media Geométrica | 0,25 | 8,45 | 0,05 | 4,11 | 0,03 | 3,72 |
| | Rango Intercuartílico | 1,42 | 0,59 | 0,37 | 5,86 | 0,11 | 7,73 |
| n | Media Aritmética | 1,94 | 2,95 | 1,70 | 2,78 | 1,59 | 2,58 |
| | Desviación Estándar | 0,54 | 0,18 | 0,35 | 0,49 | 0,27 | 0,44 |
| RMSE [mA] | Media Aritmética | 19,14 | 92,44 | 80,23 | 311,70 | 121,88 | 463,21 |
| | Desviación Estándar | 9,52 | 25,35 | 54,98 | 127,51 | 68,38 | 180,59 |
| Tiempo [s] | Media Aritmética | 79,91 | 53,51 | 75,64 | 42,29 | 104,19 | 71,06 |
| | Desviación Estándar | 32,35 | 19,69 | 51,29 | 21,37 | 64,99 | 45,35 |

En la Figura 10, se realizó un análisis estadístico para el submódulo 1, dividiendo las 30 muestras tomadas en 10 muestras para cada escenario de irradiancias, observándose que entre mayor sea el nivel de irradiancia en el que se obtienen las curvas, los parámetros estimados presentan una mejor precisión, ya que los estadísticos como el rango intercuartílico y la desviación estándar disminuyen, además de que el RMSE aumenta en todos los escenarios para la estimación que se realiza sin proceso de filtrado.

Tabla 4

Estimación de los parámetros del diodo de baipás para el submódulo 1 mediante el algoritmo PSO con los 3 escenarios

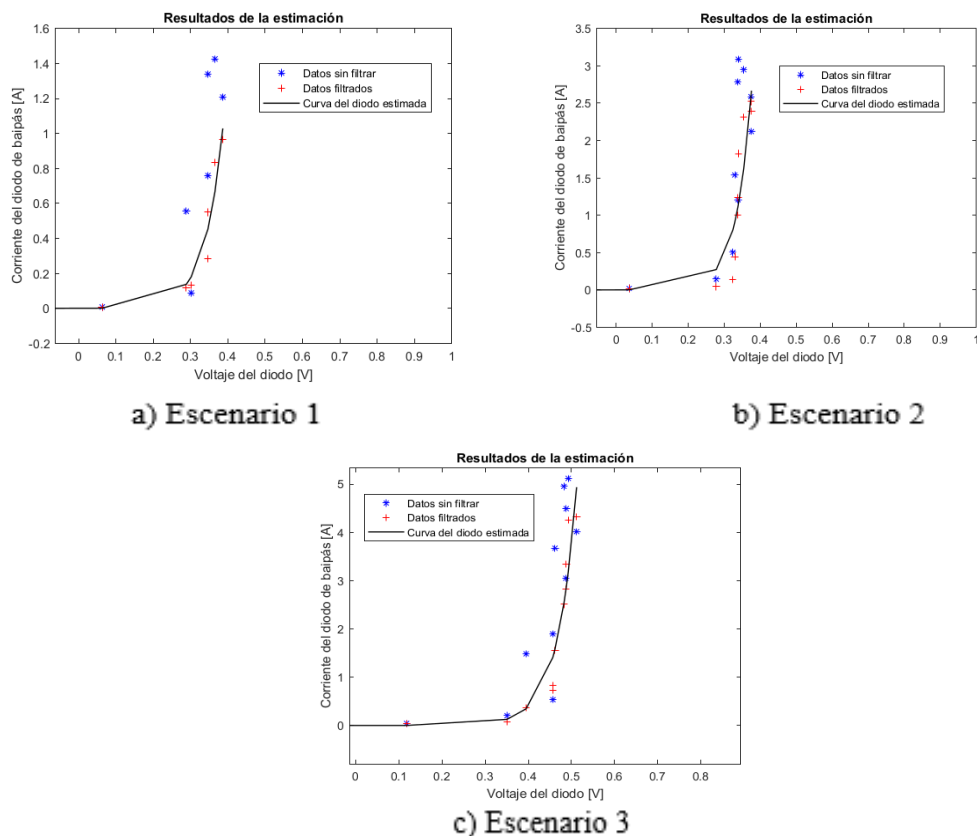
| Escenario | Filtro | I_{sat} [μA] | η | RMSE [mA] | Tiempo [s] |
|-----------|--------|-----------------------|--------|-----------|------------|
| 1 | Con | 368,44 | 1,86 | 41,78 | 83,77 |
| | Sin | $1,00 \times 10^4$ | 2,94 | 117,30 | 49,49 |

| | | | | | |
|---|-----|--------------------|------|--------|--------|
| 2 | Con | 413,43 | 1,58 | 193,50 | 58,76 |
| | Sin | $1,00 \times 10^4$ | 2,43 | 354,00 | 20,41 |
| 3 | Con | 44,11 | 1,57 | 230,90 | 122,06 |
| | Sin | $7,22 \times 10^3$ | 2,79 | 479,30 | 123,62 |

Se observa en la Tabla 4 que en los 3 escenarios del submódulo 1 los resultados más cercanos a los valores de referencia fueron los obtenidos con el proceso de filtrado, resaltando que a su vez también fueron los resultados con una menor variación en la estimación. Entre ellos el mejor escenario es el 3 ya que la curva I-V tiene un mejor ajuste a los puntos y un mayor número de puntos para realizar la estimación, lo que contribuye a disminuir la variación en los parámetros estimados.

Figura 15

Curvas (I-V) del diodo de baipás del módulo fotovoltaico para los tres escenarios con el submódulo 1 (PSO)



En la Figura 15 se puede apreciar cómo se reduce el nivel de ruido en las mediciones con el proceso de filtrado. Como se observa en la Tabla 4, la estimación de los parámetros presenta un menor RMSE con respecto a la estimación sin filtro. Adicionalmente, para las curvas obtenidas en irradiancias altas, se tiene un mayor número de puntos, lo que genera una menor variación en los parámetros estimados, tal como se observa en (c). Debido a lo anterior, se considera que se obtiene una estimación con mayor precisión, al aplicar el proceso de filtrado y obtener las curvas (I-V) en condiciones de alta irradiancia.

En la Figura 15, en (a) se aprecia la curva I-V del diodo de baipás en irradiancias bajas para el submódulo, evidenciando como el nivel de irradiancia influye en la obtención de la curva con una cantidad menor de puntos en comparación con los otros escenarios, lo que puede ocasionar que los parámetros se alejen de los valores de referencia, es decir, entre una mayor irradiancia en las muestras estas describen un mejor tipo de comportamiento que debe tener un diodo.

Ahora se muestran los siguientes resultados con SOS para las mismas muestras usadas en PSO:

Tabla 5

Estimación de los parámetros del diodo de baipás para el submódulo 1 mediante el algoritmo SOS con los 3 escenarios

| Escenario | Filtro | I_{sat} [μA] | η | RMSE [mA] | Tiempo [s] |
|-----------|--------|-----------------------|--------|-----------|------------|
| 1 | Con | 368,44 | 1,86 | 41,77 | 376,73 |
| | Sin | $1,00 \times 10^4$ | 2,96 | 117,00 | 198,64 |

| | | | | | |
|---|-----|--------------------|------|--------|---------|
| 2 | Con | 413,43 | 1,59 | 193,50 | 1207,93 |
| | Sin | $1,00 \times 10^4$ | 2,44 | 354,00 | 316,23 |
| 3 | Con | 44,10 | 1,58 | 230,90 | 646,19 |
| | Sin | $7,22 \times 10^3$ | 2,79 | 479,30 | 522,64 |

Al comparar los resultados de la Tabla 5, con los valores obtenidos en la Tabla 4, se observa que los parámetros estimados son aproximadamente iguales, a excepción de los tiempos de cómputo, ya que el algoritmo SOS tiene tiempos de cómputo superiores a los mostrados por PSO, pero los resultados de la estimación son muy cercanos, por ello se opta por no mostrar las curvas I-V de este método.

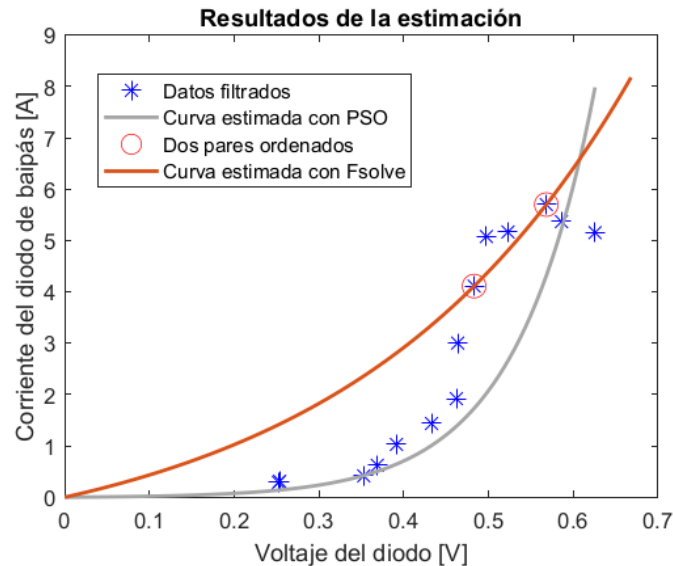
Análisis entre los métodos propuestos en la Universidad Industrial de Santander (UIS) en la obtención de los parámetros del diodo de baipás mediante curvas I-V

Ahora, se propone demostrar que el método propuesto por Vélez (2019), no es preciso, debido que este considera la estimación de los parámetros del diodo de baipás con solo dos puntos de la curva I-V, puntos que se seleccionan al 50% y al 80% en la corriente de la curva del diodo de baipás, estas traen consigo sus respectivos valores de tensión e introducidos en la ecuación del diodo shockley (1) generando dos ecuaciones con dos incógnitas no lineales y resueltas mediante el comando Fsolve de Matlab, acción que puede traer muchos inciertos y depender del azar, ya que en todas las curvas I-V obtenidas experimentalmente se detectó ruido, lo que genera fallo en el método, así se aumenten los criterios de parada, ya que no depende de su método numérico (Fsolve), sino de los puntos seleccionados. Ahora bien, si se toman todos los valores de la curva

I-V del diodo y se realiza el respectivo proceso de filtrado, se obtendrá un mejor ajuste y una menor variación de los parámetros estimados, tal como se observa en la Figura 16.

Figura 16

Comparación entre el método de Fsolve usando dos pares ordenados y PSO



En la Figura 16 se tomó una curva de irradiancias altas para el submódulo 2 como se observa en color gris la curva I-V del diodo de baipás con el método de PSO y en color granate con el método de Fsolve, con el cual se obtuvieron los parámetros $I_{sat,db} = 237,88 \text{ } [\mu\text{A}]$, $\eta_{db} = 1,75$ y $I_{sat,db} = 1,21 \text{ } [\text{A}]$, $\eta_{db} = 11,47$ respectivamente, evidenciando unos parámetros encontrados con el método de Fsolve poco precisos, ya que el factor de idealidad de referencia del módulo es de $\eta_{db} = 1,435$, valor que no debe aumentar tanto al pasar los años, mostrando además de esto, una corriente de saturación inversa muy grande comparada con su referencia.

Estudio del desgaste de los diodos de baipás en el módulo empleado

Por último, se presentó un trabajo adicional que permitió evidenciar el desgaste de cada uno de los diodos de baipás en el módulo, para esto, se estableció la necesidad de comparar los

factores de idealidad, ya que estos son los que tienen asociados el desgaste del diodo, por ello, se utilizó la siguiente ecuación donde se consiguió la diferencia porcentual entre los valores estimados mediante el método 2 PSO y los valores de fábrica, siendo esta la diferencia que se asoció al deterioro del diodo.

$$E_{ex} = \frac{|valor\ teórico - valor\ experimental|}{valor\ teórico} \times 100\% \quad (10)$$

Tabla 6

Desgaste en los diferentes diodos de baipás del módulo fotovoltaico

| Valor del factor de idealidad del diodo de referencia del datasheet | | |
|---|--------------------|--------|
| | $\eta_{db} = 1,44$ | |
| | Submódulo 1 | |
| $\eta_{db} = 1,74$ | | 20,83% |
| | Submódulo 2 | |
| $\eta_{db} = 1,87$ | | 29,86% |
| | Submódulo 3 | |
| $\eta_{db} = 1,84$ | | 27,78% |

En la Tabla 6, es posible observar que cada diodo tiene un desgaste diferente, ya que, como se mencionó anteriormente, el módulo se encuentra ubicado en la terraza del Edificio Camilo Torres de la UIS, circunstancia que lo afecta tanto por las condiciones climáticas como por los sombreados parciales del edificio y las causas naturales que se presentan. Por ello, es posible apreciar que el desgaste del diodo del submódulo 1 es menor ya que se encuentra ubicado en una mejor posición en la terraza del Edificio, como se evidencia en la Figura 4 del montaje

experimental, el submódulo 2 y 3 están más cercanos a la pared que el 1 por lo cual se ven más afectados por sombras generadas de acuerdo con la hora del día.

▪ ***Efecto de los errores en la medición de corriente y tensión***

En el momento de obtener los valores de corriente y tensión para las curvas A, B y C, los instrumentos de medición generan un error mínimo y un error máximo, debido a la exactitud de los instrumentos, este valor se encuentra en sus especificaciones.

La carga utilizada en el montaje experimental posee en sus especificaciones de fabricante, una precisión para las mediciones de corriente de $\pm (0,2\% + 0,15\% \text{ FS})$ [A] y de $\pm (0,02\% + 0,025\% \text{ FS})$ [V] en las mediciones de tensión, la carga fue configurada para todas las mediciones con un FS de corriente de 16 [A] y un FS, es decir, factor de seguridad en tensión de 70 [V].

Para estos cálculos se usa una corriente mínima de 0 [A] y máxima de 9,18 [A] al ser la corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico y una tensión mínima de 0,1 [V] y máxima de 38,4 [V] al ser el voltaje de circuito abierto del módulo.

$$\varepsilon I_A = \varepsilon I_B = \varepsilon I_C = \begin{cases} \pm 24 \text{ mA} & I = 0 \text{ A, mínimo} \\ \pm 42 \text{ mA} & I = 9,18 \text{ A, máximo} \end{cases} \quad (11)$$

$$\varepsilon V_A = \varepsilon V_B = \begin{cases} \pm 18 \text{ mV} & V = 0,1 \text{ V, mínimo} \\ \pm 25 \text{ mV} & V = 38,4 \text{ V, máximo} \end{cases} \quad (12)$$

Para el error estimado en la tensión V_C (i) se modifica a una tensión máxima de 25,6 [V] al estar activados solo dos submódulos como se explica en el procedimiento en la ecuación (6).

$$\varepsilon V_C = \begin{cases} \pm 12 \text{ mV} & V = 0,1V, \text{mínimo} \\ \pm 17 \text{ mV} & V = 25,6V, \text{máximo} \end{cases} \quad (13)$$

Al diodo depender de los cálculos entre V_B y V_C este error influye en la tensión mediante la ecuación:

$$\varepsilon Vdb_{Nm} = \sqrt{(\varepsilon V_B)^2 + (\varepsilon V_C)^2} \quad (14)$$

$$\varepsilon Vdb_{Nm} = \begin{cases} \pm 21,6 \text{ mV} & V = 0,1V, \text{mínimo} \\ \pm 30,2 \text{ mV} & V = 38,4V, \text{máximo} \end{cases} \quad (15)$$

$$\varepsilon Idb_{Nm} = \begin{cases} \pm 24 \text{ mA} & I = 0A, \text{mínimo} \\ \pm 42 \text{ mA} & I = 9,18A, \text{máximo} \end{cases} \quad (16)$$

3. Conclusiones

- Este método tiene un mejor desempeño cuando la curva I-V se toma con un nivel de irradiancia alto (cercano a los $1000 \left[\frac{W}{m^2}\right]$), ya que los parámetros estimados presentan una mayor cantidad de puntos, es decir, una menor variabilidad.
- Debido al nivel del ruido o la viabilidad, no es aconsejable tomar únicamente dos puntos sobre la curva I-V para realizar la estimación de los parámetros, ya que el ruido propio de las mediciones puede afectar considerablemente los resultados.
- La estimación de los parámetros del diodo de baipás depende del método numérico empleado, del nivel de irradiancia, del proceso de filtrado que se aplique y del error en la toma de mediciones de las curvas (I-V).

- El algoritmo con un único agente de búsqueda empleado en este trabajo tuvo un desempeño bastante deficiente y presento variaciones en los parámetros estimados dependientes del punto inicial del método, por lo que se supone que, con los criterios de parada utilizados, el algoritmo se detiene en mínimos locales.
- De los dos algoritmos globales el que logro un mejor desempeño fue PSO, ya que ambos algoritmos presentan resultados similares, pero fue notoria la disminución en el tiempo empleado en la estimación de los parámetros.
- Al ser datos experimentales y obtenidos en un entorno no controlado, es de utilidad aplicar un proceso de filtrado, con el fin de mejorar la extracción de los parámetros del diodo de baipás.
- Se observa en los resultados del módulo estudiado que los tres diodos tienen diferentes valores de desgaste, el diodo del submódulo 1 es el que está en mejores condiciones, se asume que esto se da debido a la ubicación de este, ya que no le afectaron sombras excluyendo a las producidas por las nubes.

4. Recomendaciones

- La toma de las curvas (I-V) se debe realizar con un equipo de medición que tenga el menor error posible, ya que el ruido propio de las mediciones afecta de manera fuerte el resultado de la estimación de los parámetros.
- Se aconseja realizar un proceso de filtrado, con el fin de tratar de reducir el impacto del ruido en las mediciones en el proceso de estimación.

- Es recomendable utilizar algoritmos de optimización global para realizar la estimación de los parámetros del diodo de baipás, ya que los algoritmos de optimización local pueden quedar atrapados en mínimos locales de la función objetivo.

Referencias Bibliográficas

- Accarino, J., Petrone, G., & Ramos, C. (2013). Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model. *International Conference on Clean Electrical Power ICCEP*, 62–66.
- Archer, M., & Hill, R. (2001). *Clean electricity from photovoltaics*. Reino Unido: Imperial College. University of Northumbria.
- Ayop, R., Wei Tan, C., Saiful, M., Mahmu, A., Nasir, S., Al-Hadhrami, T., & Lawan, A. (2020). A simplified and fast computing photovoltaic model for string simulation under partial shading condition. *Sustainable Energy Technologies and Assessments. Volume 42*.
- Bastidas, J., Petrone, G., & Ramos, C. (2017). A genetic algorithm for identifying the single diode model parameters of a photovoltaic panel. *Mathematics and Computers in Simulation. Volume 131*, 38-54.
- Blakesley, J., Castro, F., Koutsourakis, G., Laudani, A., Lozito, G., & Riganti, F. (2020). Towards non-destructive individual cell I-V characteristic curve extraction from photovoltaic module measurements. *Solar Energy. Volume 202*, 342-357.
- Bowler, J., Trung Thành, N., & Sacks, P. (2020). *Evaluation of electrical conductivity and magnetic permeability variations with depth from surface voltage measurements*. Inverse Problems in Science and Engineering.
- Cengiz, M., & Mamiş, M. (2015). Price-Efficiency Relationship for Photovoltaic Systems on a Global Basis. *Int. J. Photoenergy*, 1–12.

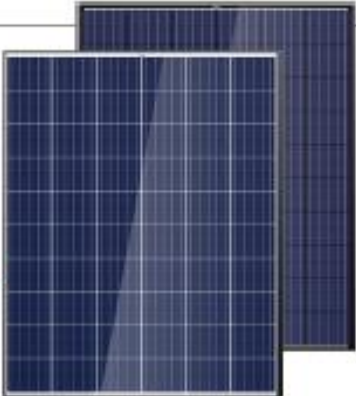
- Chan, D., & Phang, J. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. *IEEE Trans. Electron Devices* 34, 286–293.
- Cheng, M., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: a new metaheuristic optimization algorithm *Comput. Struct*, 98-112.
- Ciocia, A., Di Leo, P., Fichera, S., Giordano, F., Malgaroli, G., & Spertino, F. (2020). A novel procedure to adjust the equivalent circuit parameters of photovoltaic modules under shading. *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 711-715.
- De Soto, W., Klein, S., & Beckman, W. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Sol. Energy* 80, 78-88.
- Ezugwu, A., & Prayogo, D. (2019). Algoritmo de búsqueda de organismos simbióticos: teoría, avances recientes y aplicaciones. *ResearchGate*, 184-209.
- Florez Gomez, C., & Rojas Zambrano, W. (2016). *Impacto de dos estrategias de irrigación en la potencia generada y la temperatura de operación de un panel fotovoltaico upsolar 250w instalado sobre techo verde en la ciudad de bucaramanga*. Bucaramanga. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Ghanshyam, G., Tejani, V., Savsani, J., & Vivek, K. (2016). Adaptive symbiotic organisms search (SOS) algorithm for structural design optimization. *Journal of Computational Design and Engineering. Volume 3*, 226-249.

- Ghosh, S., Yadav, V., & Mukherjee, V. (2019). Improvement of partial shading resilience of PV array though modified bypass arrangement. *Renew Energy* 143, 1079-1093.
- Hacke, P. (2013). Testing and Analysis for Lifetime Prediction of Crystalline Silicon PV Modules Undergoing Degradation by System Voltage Stress. *IEEE Journal of Photovoltaics*. Vol. 3, 246-253.
- Hernández, E., Quintero, L., & Torres, M. (2016). *Caracterización de la operación de paneles fotovoltaicos en condiciones tropicales bajo la influencia de un techo verde*. Bucaramanga. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Hovel, H. (1975). *Semiconductors and Semimetals: Volume 11-Solar Cells*. New York: Academic Press.
- Humaid, M., Manish, K., & Rajesh, G. (2020). Bypass diode effect on temperature distribution in crystalline silicon photovoltaic module under partial shading. *Solar Energy*. Volume 208, 182-194.
- Johnson, Richard, Arnold, Miller, & Freund's. (2018). *Probability and Statistics for Engineers*. Ninth edition. Global edition: Pearson.
- Lamigueiro, O., Colmenar, A., & Castro, M. (2012). *Diseño de sistemas fotovoltaicos*. España: Haro Artes Graficas.
- Martínez, F., Muñoz, J., & Lorenzo, E. (2010). Experimental model to estimate shading losses on PV arrays. *Sol Energy Mater Sol Cells* 94, 2298-2303.

- Muhammad, I., Rathiah, H., & Noor, E. (2013). An Overview of Particle Swarm Optimization Variants. *Procedia Engineering*. Volume 53, 491-496.
- Ocaya, R. O. (March de 2014). A current–voltage–temperature method for fast extraction of schottky diode static parameters. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 49, 246-255. doi:10.1016/j.measurement.2013.11.059
- Pulli, E., Rozzi, E., & Bella, F. (2020). *Transparent photovoltaic technologies: Current trends towards upscaling*, *Energy Conversion and Management*.
- Sera, D., Teodorescu, R., & Rodriguez, P. (2007). PV panel model based on datasheet values. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2392–2396.
- Vélez, J. (2019). *Metodología no invasiva para la estimación de parámetros del diodo bypass de un módulo fotovoltaico con celdas policristalinas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Apéndices

Apéndice A. Especificaciones técnicas módulo solar

Mono **Mult** Solutions


THE ALLMAX

MODULE

60 CELL
MULTICRYSTALLINE MODULE

255-270W
POWER OUTPUT RANGE

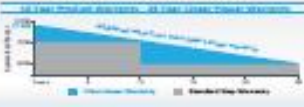
16.5%
MAXIMUM EFFICIENCY

0~+5W
POSITIVE POWER TOLERANCE


As a leading global manufacturer of next generation photovoltaic products, we believe close cooperation with our partners is critical to success. With local presence around the globe, Trina is able to provide exceptional service to each customer in each market and supplement our innovative, reliable products with the backing of Trina as a strong, bankable partner. We are committed to building strategic, mutually beneficial collaboration with installers, developers, distributors and other partners as the backbone of our shared success in driving smart energy together.

Trina Solar Limited
www.trinasolar.com

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY




Trinasolar
Smart Energy Together

- 


Our most versatile product

 - Compatible with all major BOS components and system designs
 - 1000V UL/1000V IEC certified

- 


Maximize Limited Space

 - 60-cell module power output up to 270W
 - Up to 165 W/m² power density

- 

Highly reliable due to stringent quality control

 - Over 30 in-house tests (UV, TC, HF, and many more)
 - In-house testing goes well beyond certification requirements
 - PID resistant
 - 100% EL double inspection








- 

Certified to withstand challenging environmental conditions



 - 2400 Pa wind load
 - 5400 Pa snow load
 - 35 mm hail stones at 97 km/h

Comprehensive products and system certificates

- IEC 61215/ IEC 61730/ UL 1703/ IEC 61701/IEC 62714
- ISO 9001: Quality Management System
- ISO 14001: Environmental Management System
- ISO 14064: Greenhouse Gases Emissions Verification
- OHSAS 18001: Occupation Health and Safety Management System

Apéndice B. Especificaciones técnicas Diodo de bypass

| | | |
|---|---------------|---|
|  | 硅 N 型肖特基整流二极管 |  |
| | GF3045T | |

产品概述

GF3045T 采用沟槽肖特基二极管芯片及集成封装工艺，具有较低的正向压降特性和良好的高温特性。典型应用为太阳能电池旁路保护。

产品特点

- 高开关速度
- 低正向压降
- 低功率损耗
- 高可靠性

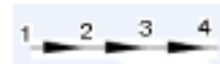
特征参数

| 符号 | 额定值 | 单位 |
|-----------------|------|----|
| V_{RRM} | 45 | V |
| $I_F (AV)$ | 30 | A |
| $V_F (I_F=30A)$ | 0.55 | V |

集成封装



内部结构图

极限值 (Per Diode) (除非另有规定, $T_c=25^\circ\text{C}$)

| 参数名称 | 符号 | 额定值 | 单位 |
|---|-----------------|---------|--------------------|
| 最大可重复峰值反向电压 | V_{RRM} | 45 | V |
| 最大直流阻断电压 | V_R | 45 | V |
| 平均整流电流 | $I_F (AV)$ | 30 | A |
| 不可重复峰值浪涌电流 (Surge Applied at Rated Load Conditions Half wave, Single Phase, 60Hz) | I_{FSM} | 600 | A |
| 最高工作结温 | T_j | 200 | $^\circ\text{C}$ |
| 贮存温度 | T_{stg} | -55~150 | $^\circ\text{C}$ |
| 结到壳的热阻 | $R_{\theta JC}$ | 1.6 | $^\circ\text{C/W}$ |



GF3045T

电特性 (Per Diode) (除非另有规定, $T_j=25^\circ\text{C}$)

| 参数名称 | 符号 | 测试条件 | 规范值 | | | 单位 |
|-------|----------|---|-----|------|------|----|
| | | | 最小 | 典型 | 最大 | |
| 击穿电压 | V_{BR} | $I_F=500\mu\text{A}$ | 45 | | | V |
| 正向压降 | V_F | $I_F=20\text{A}, T_j=25^\circ\text{C}$ | | 0.45 | 0.49 | V |
| | | $I_F=30\text{A}, T_j=25^\circ\text{C}$ | | 0.5 | 0.55 | V |
| 反向漏电流 | I_{R1} | $V_R=45\text{V}, T_j=25^\circ\text{C}$ | | | 0.1 | mA |
| | | $V_R=45\text{V}, T_j=125^\circ\text{C}$ | | | 50 | mA |

• 脉冲测试, 脉冲宽度 $t_p=300\mu\text{s}$, 占空比 $\leq 2\%$

有害物质说明

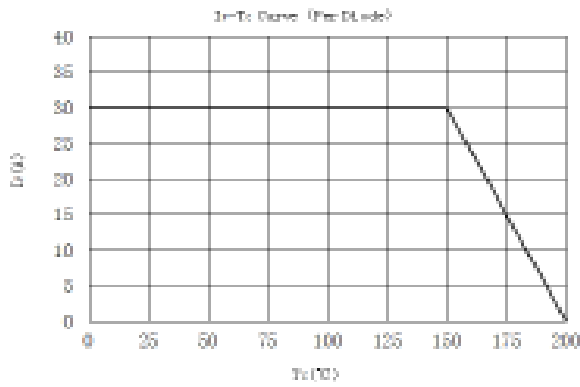
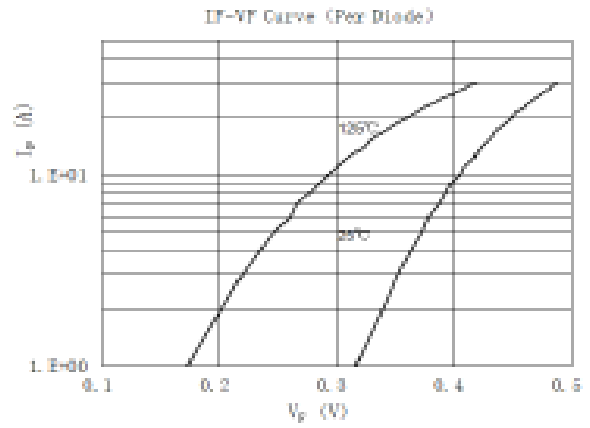
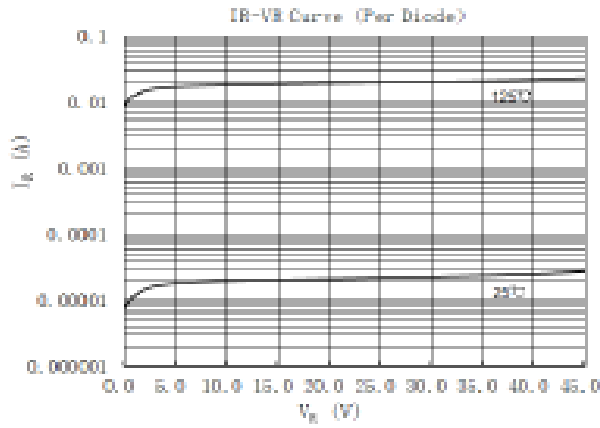
| 部件名称 (含量要求) | 有毒有害物质或元素 | | | | | | | | | |
|----------------|---|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 铅 | 汞 | 镉 | 六价铬 | 多溴联苯 | 多溴二苯醚 | 邻苯二甲酸二异丁酯 | 邻苯二甲酸酯 | 邻苯二甲酸丁酯 | 邻苯二甲酸丁苯酯 |
| | Pb | Hg | Cd | Cr(VI) | PBB | PBDE | DBP | DEHP | DBP | BBP |
| | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.01\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ | $\leq 0.1\%$ |
| 引线框 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 塑封树脂 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 管芯 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 内引线 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 焊料 | × | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 说明 | <p>○: 表示该元素的含量在 2011/65/EU 标准的限量要求以下。</p> <p>×: 表示该元素的含量超出 2011/65/EU 标准的限量要求。</p> <p>目前产品的焊料中含有铅 (Pb) 成分, 但属于欧盟 RoHS 指令豁免范围。</p> | | | | | | | | | |



GF3045T



特性曲线

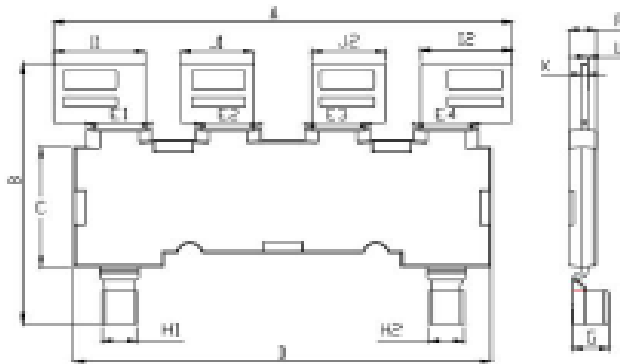




GF3045T



外形图: SPM-001



| Items | Values (mm) | |
|-------|-------------|-------|
| | Min | Max |
| A | 71.15 | 71.85 |
| B | 38.7 | 39.4 |
| C | 17.75 | 18.05 |
| D | 64.85 | 65.15 |
| E1 | 10.05 | 10.35 |
| E2 | 10.05 | 10.35 |
| E3 | 10.05 | 10.35 |
| E4 | 10.05 | 10.35 |
| F | 4.05 | 4.35 |
| G | 5.3 | 5.7 |
| H1 | 5.2 | 5.7 |
| H2 | 5.2 | 5.7 |
| I1 | 14.1 | 14.4 |
| I2 | 14.1 | 14.4 |
| J1 | 11.35 | 11.65 |
| J2 | 11.35 | 11.65 |
| K | 0.6 | 0.8 |
| L | 0.15 | 0.25 |

注意事项

- 1) 凡华润华晶出厂的产品, 均符合相应规格书的电参数和外形尺寸要求; 对于客户有特殊要求的产品, 双方应签订相关技术协议。
- 2) 建议器件在最大额定值的 80% 以下使用; 在安装时, 要注意减少机械应力的产生, 防止由此引起的产品失效; 避免靠近发热元件; 焊接上锡时要注意控制温度和时间。
- 3) 本规格书由华润华晶公司制作, 并不断更新, 更新时不再专门通知。

联络方式

无锡华润华晶微电子有限公司

公司地址 中国江苏无锡市梁溪路 14 号

邮编: 214061

网址: <http://www.crhj.com.cn>

电话: 0510-8180 7228

传真: 0510-8180 0864

市场营销部

邮编: 214061

电话: 0510-8180 5277 / 8180 5336

传真: 0510-8180 0360 / 8180 3016

应用服务

电话: 0510-8180 3243

传真: 0510-8180 3110

Apéndice C. Especificaciones técnicas BK precisión 8500

Data Sheet

DC Electronic Loads 8500 Series



Versatile & Economical DC Electronic Loads

The 8500 series Programmable DC Electronic Loads can be used for testing and evaluating a variety of DC power sources. Their wide operating ranges of up to 500 V and 240 A, flexible operating modes and excellent measurement accuracy make the 8500 series well suited for characterizing DC Power supplies, DC-DC Converters, batteries, fuel cells and solar cells.

The loads can operate in CC, CV, CR or CP mode while voltage/current or resistance/power values are measured and displayed in real time. Load terminals are isolated and floating. Over temperature, over power, over voltage, over current and reverse polarity protection will help protect your valuable prototype and circuits.

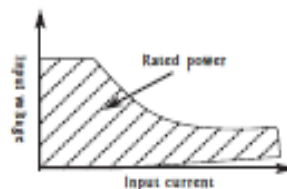
The DC loads are easy to use. All parameters can be set quickly and precisely from the front panel, or programmed via USB interface.

The 8500 family offers 10 models with a wide range of ratings

| Model | Power | Operating Voltage | Rated Current |
|-------|--------|-------------------|---------------|
| 8500 | 300 W | 0.1 - 120 V | 30 A |
| 8502 | 300 W | 0.1 - 500 V | 15 A |
| 8510 | 600 W | 0.1 - 120 V | 120 A |
| 8512 | 600 W | 0.1 - 500 V | 30 A |
| 8514 | 1200 W | 0.1 - 120 V | 240 A |
| 8518 | 1200 W | 0.1 - 60 V | 240 A |
| 8520 | 2400 W | 0.1 - 120 V | 240 A |
| 8522 | 2400 W | 0.1 - 500 V | 120 A |
| 8524 | 5000 W | 0.1 - 60 V | 240 A |
| 8526 | 5000 W | 0.1 - 500 V | 120 A |

When selecting a DC load, it is important to consider not only voltage and current requirements, but also power ratings. The power used when testing must fall within the hatched region for the appropriate DC load.

Some applications may require high voltage/low current and low voltage/high current which a single load may not be able to handle. B&K Precision's broad range of DC loads will allow you to select the optimal model for your requirements.



DC Electronic Loads
8500 Series

Features

- Constant current (CC), resistance (CR), voltage (CV) and power (CP) operation
- Wide voltage and current range, 0 to 500 V, 0 to 240 A (5000 W max)
- Low minimum operating voltage of < 0.1 V and minimum input resistance of 5 mΩ (model 8518) allowing the load to sink high current at low voltages, required for fuel and solar cell applications
- Selected models operate up to 500 V suitable for high voltage applications
- Built-in transient generator
- Short circuit test
- Built-in high resolution (0.1 mV) mV voltage and current measurement (models 8500 & 8502)
- Bright, easy to read display (MFD technology)
- Over-Current/Over-Voltage/Over-Power/Over-Temperature Protection
- USB to TTL serial converter cables and application software included
- Lix mode operation for increased throughput.
- Battery testing mode to provide A*hr rating of battery (ending voltage level is adjustable)
- Flexible triggering: Create trigger events by front panel keystroke, back panel TTL signal, or software
- Remote voltage sensing to compensate for the effect of voltage drop in wires.
- Store 25 instrument setups
- Thermosatically-controlled fans allow operation in quiet environments with minimal disruption
- All models are rack mountable. Compact: 300 W and 600 W models for bench use

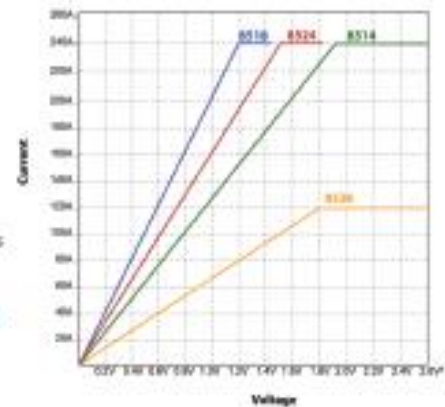


Applications:

- DC power supply testing
- Characterization of rechargeable batteries. A battery test mode is provided that will measure the ampere*hour (A*hr) characteristic of a battery
- Fuel and solar cell test
- High voltage applications

Low voltage operation

The 8500 series can operate well below 1 V which is important for low voltage application such as fuel cell and solar cell testing. All models can regulate (provide a stable input) down to 0.1 V. Model 8518, due to its particularly low input resistance, can operate at full scale current of 240 A at 1.2 V (see image)



Typical minimum operating voltage at full scale current:

| 8500 | 8502 | 8510 | 8512 | 8514 | 8518 | 8520 | 8522 | 8524 | 8526 |
|--------|------|-------|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 1.0s V | 3 V | 1.8 V | 3 V | 1.92 V | 1.2 V | 10.8 V | 3.6 V | 1.56 V | 1.8 V |

DC Electronic Loads
8500 Series

▲ Front panel

The numeric keys and rotary knob provide a convenient interface for setting the operating mode and desired current/voltage/resistance levels quickly and precisely. Voltage and current can be set to a maximum resolution of 1 mV and 0.1 mA respectively (models 8500 and 8502 only). Up to 25 different instrument setups can be stored and recalled from internal memory.

1) High resolution, easy to read display
Displays set values and measured values. Current/voltage and power/resistance displays can be toggled. Display resolution for current and voltage is user-selectable. Maximum resolution for model 8500 and 8502 is 1 mV/0.1 mA.

2) Convenient data entry
Rotary knob for quick analog-style control. Turn to adjust a setting value. Press to toggle measurement display mode.

3) Numeric keypad
Conveniently enter set values directly and access secondary functions.



4) Function keys
Activate current, voltage, power, or resistance modes and scroll through menus and options.

5) Front panel load terminals
Connect to device under test. Hex-head screw

Hex-head screw terminals

Terminals are used for models 8518 and 8520 – 8526 to connect wires.



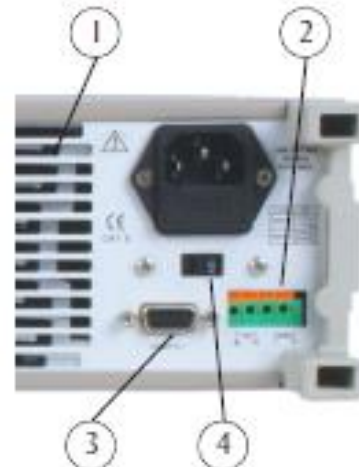
▲ Rear panel

1) Air vents
Temperature-controlled fan expels air through these vents to keep the temperature constant inside the system.

2) Trigger and remote sensing terminal block
Connect sensing lines to this terminal to compensate for voltage drops due to load wire resistance. This terminal block also contains the two connectors for the remote TTL trigger input signal.

3) Interface connection
Serial interface connector for USB communication.

4) Voltage switch
Line voltage selection switch (110 VAC or 220 VAC).



DC Electronic Loads 8500 Series

▲ Flexible operating modes

CC, CR, CV and CP mode

In Constant Current (CC) mode, the load will sink a current according to the programmed current value regardless of the input voltage. (CC) mode can be used for load regulation testing of DC power supplies or for characterizing the discharge profile of a battery.

Constant Power (CP) mode simulates a load whose power consumption is independent of the applied voltage. Constant Power (CP) mode is useful for battery testing and simulating a realistic discharge curve.

In Constant Voltage (CV) mode, the load will attempt to sink enough current to control the source voltage to the programmed value. This mode is suitable for testing battery chargers.

In Constant Resistance (CR) mode, the load will sink a current linearly proportional to the input voltage in accordance with the programmed

resistance. Unlike conventional resistors, the load resistance stays constant regardless of the power level.

Transient generator

The 8500 series offers a variable frequency generator which can be used in all operating modes. The DC load will toggle between 2 preset levels at a frequency between 0.1 Hz to 1 kHz, either continuously or controlled by a trigger.

Triggered operation

Triggering is used to allow synchronization of the DC Load's behavior with other events. You can generate a trigger event by front panel keystroke, by applying an external TTL signal to the back panel terminal or by sending a commands over the serial bus. The trigger can be used in pulse mode, transient mode, list mode and works in CC, CR, CV and CP modes.



Model 8500

▲ Remote control & application software

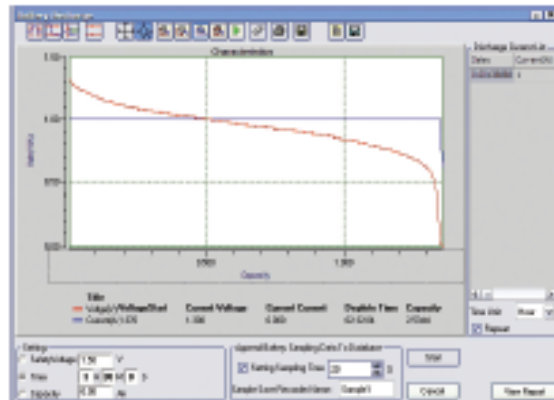
The DC loads can be remotely controlled from any PC with USB interface, allowing the user to fully program and monitor all parameters. USB to TTL serial converter cables are included. For users wanting to write their own custom software, a set of example programs are available for download on the B&K Precision website.

List Mode

A list of command sequences can be stored in non-volatile memory and executed independently of a computer. Execution in list mode greatly reduces command processing time and computer interaction during product testing. The command sequence can be entered manually from the front panel or downloaded from a PC via USB interface.

Application Software

The included Application Software supports front panel emulation of the load and includes a battery test application which provides A*hr rating of a battery and adjustable ending voltage levels (safety voltage).



An example of battery discharge characteristics of an AA alkaline battery.

Whether you are designing a device with Nickel-Metal Hydride or Lithium-Ion batteries, the 8500 series have the capabilities to test their characteristics.

DC Electronic Loads
8500 Series

Specifications

▲ Models 8500 & 8502 (300 W)

| Parameter | | 8500 | 8502 |
|--------------|---------|-----------|-----------|
| Input rating | Voltage | 0 – 120 V | 0 – 500 V |
| | Current | 0 – 30 A | 0 – 1s A |
| | Power | 300 W | |

| Parameter | Range | | Accuracy | Resolution |
|---------------------|-------------|-------------|---|------------|
| | 8500 | 8502 | | |
| CV Mode | 0.1–18 V | | $\pm(0.0s\%+0.02\% FS)$ | 1 mV |
| Regulation | 0.1 – 120 V | 0.1 – 500 V | $\pm(0.0s\%+0.02s\% FS)$ | 10 mV |
| CC Mode | 0 – 3 A | 0 – 3 A | $\pm(0.1\%+0.1\% FS)$ | 0.1 mA |
| Regulation | 0 – 30 A | 0 – 1s A | $\pm(0.2\%+0.1s\% FS)$ | 1 mA |
| Current Measurement | 0 – 3 A | 0 – 3 A | $\pm(0.1\%+0.1\% FS)$ | 0.1 mA |
| | 0 – 30 A | 0 – 1s A | 8s00: $\pm(0.2\%+0.1s\% FS)$ 8s02: $\pm(0.2\%+0.3\% FS)$ | 1 mA |
| Voltage Measurement | 0–18 V | | $\pm(0.02\%+0.02\% FS)$ | 1 mV |
| | 0–120 V | 0 – 500 V | $\pm(0.02\%+0.02s\% FS)$ | 10 mV |

▲ Models 8510/8512/8514/8518 (600 W & 1200 W)

| Parameter | | 8510 | 8512 | 8514 | 8518 |
|--------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Input rating | Voltage | 0 – 120 V | 0 – 500 V | 0 – 120 V | 0 – 60 V |
| | Current | 0 – 120 A | 0 – 30 A | 0 – 240 A | 0 – 240 A |
| | Power | 600 W | | 1200 W | |

| Parameter | Range | | | | Accuracy | Resolution |
|---------------------|------------------|-------|--------|------|---|------------|
| | 8510 | 8512 | 8514 | 8518 | | |
| CV Mode | 0.1–18 V | | | | $\pm(0.0s\%+0.02\% FS)$ | 1 mV |
| Regulation | 0.1 V to Vmax | | | | $\pm(0.0s\%+0.02s\% FS)$ | 10 mV |
| CC Mode | 0–12 A | 0–3 A | 0–24 A | | $\pm(0.1\%+0.1\% FS)$ | 1 mA |
| Regulation | 0 – max Current | | | | $\pm(0.2\%+0.1s\% FS)$ | 10 mA |
| Current Measurement | 0–12 A | 0–3 A | 0–24 A | | $\pm(0.1\%+0.1\% FS)$ | 1 mA |
| | 0 – max. Current | | | | $\pm(0.2\%+0.1s\% FS)$ | 10 mA |
| Voltage Measurement | 0 – 18 V | | | | 8s10/8s14: $(0.02\%+0.02s\% FS)$ 8s12/8s18: $(0.02\%+0.02\% FS)$ | 1 mV |
| | 0 - Vmax | | | | $\pm(0.02\%+0.02s\% FS)$ | 10 mV |

▲ Models 8520/8522/8524/8526 (2400 W & 5000 W)

| Parameter | | 8520 | 8522 | 8524 | 8526 |
|--------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Input rating | Voltage | 0 – 120 V | 0 – 500 V | 0 – 60 V | 0 – 500 V |
| | Current | 0 – 240 A | 0 – 120 A | 0 – 240 A | 0 – 120 A |
| | Power | 2400 W | | 5000 W | |

| Parameter | Range | | | | Accuracy | Resolution |
|---------------------|------------------|--------|--------|--------|---|------------|
| | 8520 | 8522 | 8524 | 8526 | | |
| CV Mode | 0.1–18 V | | | | $\pm(0.0s\%+0.02\% FS)$ | 1 mV |
| Regulation | 0.1 V to Vmax | | | | $\pm(0.0s\%+0.02s\% FS)$ | 10 mV |
| CC Mode | 0–24 A | 0–12 A | 0–24 A | 0–12 A | $\pm(0.1\%+0.1\% FS)$ | 1 mA |
| Regulation | 0 – max Current | | | | $\pm(0.2\%+0.1s\% FS)$ | 10 mA |
| Current Measurement | 0–24 A | 0–12 A | 0–24 A | 0–12 A | $\pm(0.1\%+0.1\% FS)$ | 1 mA |
| | 0 – max. Current | | | | $\pm(0.2\%+0.1s\% FS)$ | 10 mA |
| Voltage Measurement | 0 – 18 V | | | | 8s22/8s26: $(0.02\%+0.02\% FS)$ 8s20/8s24: $(0.02\%+0.02s\% FS)$ | 1 mV |
| | 0 - Vmax | | | | $\pm(0.02\%+0.02s\% FS)$ | 10 mV |

DC Electronic Loads
8500 Series

▲ Common characteristics

| Parameter | Range | Accuracy | Resolution |
|--|---|---------------------|----------------|
| CR Mode Regulation | | | |
| (Input current \pm FS 10K Input voltage \pm FS 10K) | 0.1 - 10 Ω | $\pm(1\%+0.3\% FS)$ | 0.001 Ω |
| | 10-99 Ω | $\pm(1\%+0.3\% FS)$ | 0.01 Ω |
| | 100-999 Ω | $\pm(1\%+0.3\% FS)$ | 0.1 Ω |
| | 1K-1 K Ω | $\pm(1\%+0.8\% FS)$ | 1 Ω |
| CW Mode Regulation | | | |
| (Input current \pm FS 10K Input voltage \pm FS 10K) | 0-100 W | $\pm(1\%+0.1\% FS)$ | 1 mW |
| | 100 W - max power | $\pm(1\%+0.1\% FS)$ | 100 mW |
| Power Measurement | | | |
| (Input current \pm FS 10K Input voltage \pm FS 10K) | 0-100 W | $\pm(1\%+0.1\% FS)$ | 1 mW |
| | 100 W - max power | $\pm(1\%+0.1\% FS)$ | 100 mW |
| Other | | | |
| Battery testing function | Input = 0.1 V - 120 V, Max measurement capacity = 999 Ah Resolution = 10 mA, Timer range = 1-60000 sec | | |
| Transition mode | Range of Frequency 0.1 Hz-1 kHz, Frequency error rate 0.3% | | |
| AC Input | 110 / 220 (see note below)* VAC \pm 10%, 47 - 63 Hz | | |
| Operating temperature | 32 $^{\circ}$ F - 104 $^{\circ}$ F (0 - 40 $^{\circ}$ C) | | |
| Storage temperature | 50 $^{\circ}$ F - 140 $^{\circ}$ F (10 - 60 $^{\circ}$ C) | | |
| Humidity | \leq 95% relative humidity, non-condensing | | |
| Safety | EN61010-1:2001, EU Low Voltage Directive 73/23/EEC amended by 93/68/EEC | | |
| Electromagnetic compatibility | Meets EMC Directive 89/336/EEC amended by 93/68/EEC, EN50081-1, EN50082-1 | | |
| One-Year Warranty | | | |

* All 8500 series models, with the exception of models 8524 and 8526, can be configured for 110 V or 220 V operation via the AC line switch in the rear panel. Base models 8524 and 8526 operate with 110 V only. For 220 V operation, order model 8524-220V or 8526-220V respectively. "-220V" denotes 220 V operation only and these models cannot be reconfigured for 110 V operation.

▲ Mechanical specifications

| Model | Dimensions (W x H x D) | Weight |
|-------|---|------------------|
| 8500 | 8.46" x 3.46" x 14.1" (215 mm x 88 mm x 359 mm) | 11.5 lb (5.2 kg) |
| 8502 | 8.46" x 3.46" x 14.1" (215 mm x 88 mm x 359 mm) | 11.5 lb (5.2 kg) |
| 8510 | 17.3" x 3.46" x 18.07" (439.6 mm x 88 mm x 459 mm) | 31 lb (14 kg) |
| 8512 | 17.3" x 3.46" x 18.07" (439.6 mm x 88 mm x 459 mm) | 31 lb (14 kg) |
| 8514 | 17.3" x 3.46" x 18.07" (439.6 mm x 88 mm x 459 mm) | 31 lb (14 kg) |
| 8518 | 17.3" x 3.46" x 18.07" (439.6 mm x 88 mm x 459 mm) | 31 lb (14 kg) |
| 8520 | 17.64" x 7.28" x 21.19" (448 mm x 185 mm x 538.2 mm) | 66 lb (30 kg) |
| 8522 | 17.64" x 7.28" x 21.19" (448 mm x 185 mm x 538.2 mm) | 66 lb (30 kg) |
| 8524 | 17.54" x 14.06" x 20.94" (445.5 mm x 357 mm x 532 mm) | 148 lb (67 kg) |
| 8526 | 17.54" x 14.06" x 20.94" (445.5 mm x 357 mm x 532 mm) | 148 lb (67 kg) |

▲ Accessories

| | |
|----------|--|
| Standard | Power cord, user manual, installation CD with application software, USB to TTL serial converter IT-E132B, certificate of calibration and test report |
| Optional | Rack mount kit IT-E151 for models 8500, 8502, 8510, 8512, 8514 and 8518 only |