

METODOLOGÍA NO INVASIVA, PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS
DEL DIODO DE BYPASS DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON CELDAS
POLICRISTALINAS

JEISSON EMILIO VÉLEZ SÁNCHEZ

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

2019

METODOLOGÍA NO INVASIVA, PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS
DEL DIODO DE BYPASS DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON CELDAS
POLICRISTALINAS

JEISSON EMILIO VÉLEZ SÁNCHEZ

Trabajo de Grado para optar al título de
Magister en Ingeniería Electrónica

Director

Juan David Bastidas Rodríguez

Doctor en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Codirector

Carlos Rodrigo Correa Cely

Profesor E^3T

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

2019

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado primordialmente a Dios que me ha brindado las capacidades y habilidades necesarias para la realización de este trabajo de grado. Aquellas personas que me apoyaron en el desarrollo y ejecución de este trabajo de grado.

Una dedicatoria especial para mi novia, mi suegra y mi familia que durante este tiempo me apoyaron para hacer realidad la culminación de la maestría y la redacción de este documento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi novia, mi suegra y mi familia por el apoyo económico y moral que tuvieron para conmigo durante el desarrollo de mi maestría. También agradezco los docentes que tuve durante la maestría, porque gracias a sus conocimientos hoy en día soy un mejor profesional.

Un reconocimiento y agradecimiento especial para mi director y codirector del trabajo de grado, por dedicar su tiempo, experiencia y conocimiento en la guía de mi proyecto.

CONTENIDO

	p g.
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	25
1.1. OBJETIVO GENERAL	25
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2. MARCO REFERENCIAL	26
2.1. CELDAS Y MÓDULOS PV	26
2.2. PANELES PV	30
3. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DIODO DE BYPASS	34
3.1. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO EXISTE SOMBRA TOTAL EN EL MÓDULO	34
3.1.1. Efectos de los errores en la medición de corriente y tensión.	42
3.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO EXISTE SOMBRA PAR- CIAL EN EL MÓDULO	43
3.2.1. Efectos de los errores en la medición de corriente y tensión.	50
4. APLICACIÓN DEL MÉTODO	52
4.1. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO $I_m = 0$	55
4.1.1. Escenario 1: (Irradiancia alta):	56
4.1.2. Escenario 2: (Irradiancia media):	60
4.1.3. Escenario 3: (Irradiancia baja):	62
4.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO $I_{sc} > I_m > 0A$	63

4.2.1. Escenario 1: (Irradiancia alta):	64
4.2.2. Escenario 2: (Irradiancia media):	68
4.2.3. Escenario 3: (Irradiancia baja):	69
5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	72
5.1. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL	72
5.2. EFECTOS DE LOS ERRORES DE LA MEDICIÓN DE CORRIENTE Y TENSIÓN	74
5.3. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	76
6. CONCLUSIONES	86
7. TRABAJO FUTURO	88
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	95

LISTA DE FIGURAS

	p g.
Figura 1. Celdas, módulos, paneles y arreglos FV	27
Figura 2. Modelo y simplificación circuital de un módulo	28
Figura 3. Comportamiento del módulo ante la sombra	30
Figura 4. Modelo y simplificación circuital de un panel FV de tres módulos.	31
Figura 5. Comportamiento del panel ante la sombra.	32
Figura 6. Panel con N_m módulos y su curva I-V.	35
Figura 7. Panel con el módulo N_m sombreado y su curva I-V.	37
Figura 8. Panel con $N_m - 1$ módulos y su curva I-V.	38
Figura 9. Diferencia de tensión entre las curvas B y C	39
Figura 10. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.	41
Figura 11. Panel con módulo sombreado parcialmente y $I < I_{sc}$.	45
Figura 12. Panel con módulo sombreado, $I > I_{sc}$.	46
Figura 13. Punto de inflexión en una curva P-V.	47
Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.	50
Figura 15. Modelo circuital de un panel de tres módulos en Simulink.	53
Figura 16. Modelo circuital de un módulo PV en Simulink	54
Figura 17. Curva A, B y C obtenidas para el Escenario 1.	57
Figura 18. Curvas I-V del diodo de bypass obtenidas en el procedimiento	58
Figura 19. Curva A, B y C obtenidas para el Escenario 1.	65
Figura 20. Curvas I-V del diodo de bypass obtenidas en el procedimiento	66
Figura 21. Montaje experimental.	73
Figura 22. Curvas experimentales del Módulo 1 para irradiancia alta y media	77

Figura 23. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 1 para alta irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.	79
Figura 24. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 1 para media irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.	79
Figura 25. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 2 para alta irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.	81
Figura 26. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) de el diodo de bypass en el módulo 2 para media irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.	81
Figura 27. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 3 para alta irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.	82
Figura 28. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 3 para media irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.	83

LISTA DE TABLAS

	p g.
Tabla 1. I_{ph} y G utilizados en los escenarios de validación	55
Tabla 2. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 1)	59
Tabla 3. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 1)	60
Tabla 4. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 2)	61
Tabla 5. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 2)	62
Tabla 6. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 3)	62
Tabla 7. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 3)	63
Tabla 8. I_{ph} e G utilizados en los escenarios de validación	64
Tabla 9. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 1)	67
Tabla 10. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 1)	68
Tabla 11. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 2)	69
Tabla 12. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 2)	69
Tabla 13. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 3)	70
Tabla 14. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 3)	70
Tabla 15. Parámetros estimados para el diodo de bypass en el módulo 1 para alta y media y RMSE para la reproducción de la curva I-V.	80

Tabla 16. Voltaje térmico, temperatura del diodo de bypass y corriente de cortocircuito en el módulo 1 para alta y media irradiancia de los datos experimentales.	80
Tabla 17. Parámetros estimados para el diodo de bypass en el módulo 2 para alta y media irradiancia y RMSE para la reproducción de la curva I-V.	82
Tabla 18. Voltaje térmico, temperatura del diodo de bypass y corriente de cortocircuito en el módulo 2 para alta y media irradiancia de los datos experimentales.	82
Tabla 19. Parámetros estimados para el diodo de bypass en el módulo 3 para alta y media irradiancia y RMSE para la reproducción de la curva I-V.	83
Tabla 20. Voltaje térmico, temperatura del diodo de bypass y corriente de cortocircuito en el módulo 3 para alta y media irradiancia de los datos experimentales.	83

LISTA DE ANEXOS

	p g.
Anexo A. Especificaciones técnicas panel solar	95
Anexo B. Especificaciones técnicas Diodo de bypass	97
Anexo C. Especificaciones técnicas BK precision 8500	101

GLOSARIO

Arreglo o (Array): un arreglo o array es la unión de dos o más cadenas de paneles en paralelo para entregar los requerimientos de voltaje y corriente que requiere el sistema a alimentar.

Cadena o (String): una cadena o string es la unión de dos o más paneles conectados en serie.

Celda fotovoltaica (PV): es la unidad más pequeña de generación fotovoltaica, utiliza el efecto fotovoltaico para producir una corriente proporcional a la irradiancia presente en su superficie.

Condiciones de operación irregular o mismatching en paneles: se dan cuando las condiciones de operación en los módulos que forman un panel no son iguales. Esto se puede dar por diferencias en las irradiancias y/o temperaturas de cada módulo o por diferencias en los parámetros de los módulos.

Corriente de corto circuito (I_{sc}): es el valor máximo de corriente que puede generar el módulo fotovoltaico, cuando el voltaje del módulo es cero (0V).

Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mpp}): es el valor máximo de corriente con que se obtiene el valor máximo de potencia bajo una irradiancia específica.

Curva I-V: es la representación gráfica de los valores de corriente y tensión obtenidos de un módulo o panel PV bajo unas condiciones de irradiancia y temperatura específicas.

Diodo de bypass: es un diodo que se conecta en antiparalelo a un módulo, con la finalidad de limitar la disipación de potencia en las celdas del módulo, cuando este opera bajo condiciones irregulares.

Módulo PV: es la conexión de dos o más celdas en serie para formar un voltaje mayor al de una celda en solitario.

Panel PV: un panel solar o panel PV es un dispositivo que está formado por uno, dos o más módulos conectados entre sí, con sus respectivos diodos de bypass, enmarcados dentro de una estructura metálica y protegidos en su superficie por una lámina de vidrio o plástico.

Punto de máxima potencia: es el punto máximo en una curva P-V para una condición de operación, Irradiancia y temperatura, específica. En este punto se obtienen una corriente (I_{mpp}) y tensión (V_{mpp}) específicas.

Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): es el voltaje que se obtiene en las terminales del módulo, y no posee una carga conectada en sus terminales.

Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}): es el valor de voltaje con el que se obtiene el valor máximo de potencia bajo una irradiancia y temperatura específica.

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA NO INVASIVA, PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL DIODO DE BYPASS DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO CON CELDAS POLICRISTALINAS *

AUTOR: JEISSON EMILIO VÉLEZ SÁNCHEZ **

PALABRAS CLAVE: DIODO DE BYPASS, ESTIMACIÓN, MÉTODO NO INVASIVO, PARÁMETROS.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se proponen dos procedimientos para estimar los parámetros $I_{sat,db}$ y η_{db} del modelo exponencial de los diodos de bypass de un panel FV, usando dos curvas experimentales de corriente vs tensión (I-V). La primera curva I-V es sin sombrear el panel, para calcular un modelo de referencia. La segunda curva se obtiene cubriendo total o parcialmente el módulo en el que se desea estimar los parámetros del diodo de bypass. Con la primera curva y el número de módulos del panel (N_m), se estima una tercera curva, que representa los módulos no sombreados de la segunda curva. La curva I-V del diodo de bypass se obtiene de la resta de la tercera y segunda curva. Con dos puntos de la curva I-V del diodo de bypass, se establece un sistema no lineal de dos ecuaciones y dos incógnitas. El cual, al solucionar se determina los parámetros $I_{sat,db}$ y η_{db} del diodo de bypass. Los dos procedimientos se validaron con simulaciones y uno a través de pruebas experimentales. En las simulaciones, los errores en la estimación de los parámetros del diodo de bypass son menores al 3.6 %. Además, al reproducir la curva I-V del diodo de bypass se obtienen RMSE's menores a $800\mu V$ y $5.1mV$ para el primer y el segundo método respectivamente. En las pruebas experimentales, el primer procedimiento estimó ambos parámetros y al usarlos para reproducir la curva I-V de los diodos de bypass se obtuvo un error RMSE menor a $51mV$ para todos los escenarios planteados. Los resultados obtenidos demuestran que los métodos propuesto se pueden utilizar para monitorear el estado de los diodos de bypass, igualmente se debería considerar otros modelos para obtener una mayor precisión en la estimación de los parámetros $I_{sat,db}$ y η_{db} .

* Trabajo de maestría

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Juan David Bastidas Rodríguez, Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely, Profesor E^3T UIS

ABSTRACT

TITLE: NON-INVASIVE METHODOLOGY FOR THE BYPASS DIODES PARAMETER ESTIMATION IN A PHOTOVOLTAIC PANEL *

AUTHOR: JEISSON EMILIO VÉLEZ SÁNCHEZ **

KEYWORDS: BYPASS DIODE, ESTIMATION, NON-INVASIVE METHOD, PARAMETERS. In this document, two procedures are proposed to estimate the parameters $I_{sat,db}$ and $\eta_{a_{db}}$ of the exponential model of the bypass diodes of a PV panel, using two experimental currents of current vs voltage (IV). The first I-V curve is without shading the panel, to calculate a reference model. The second curve is obtained by totally or partially covering the module in which it is desired to estimate the parameters of the bypass diode. With the first curve and the number of modules of panel (Nm), a third curve is estimated, which represents the unshaded modules of the second curve. The curve I-V of the bypass diode is obtained by subtracting the third and second curve. With two points of the I-V curve of the bypass diode, a non-linear system of two equations and two unknowns is established. Which, when solving, determines the parameters $I_{sat,db}$ and $\eta_{a_{db}}$ of the bypass diode. The two procedures were validated with simulations and one through experimental tests. In the simulations, the errors in the estimation of the parameters of the bypass diode are less than 3.6%. In addition, when reproducing the I-V curve of the bypass diode, RMSE's less than $800\mu V$ and $5.1mV$ are obtained for the first and second methods respectively. In the experimental tests, the first procedure estimated both parameters and when using them to reproduce the I-V curve of the bypass diodes, an RMSE error of less than $51mV$ was obtained for all the proposed scenarios. The results obtained show that the proposed methods can be used to monitor the status of the bypass diodes, similarly other models should be considered to obtain a greater precision in the estimation of the parameters $I_{sat,db}$ and $\eta_{a_{db}}$.

* Master Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Juan David Bastidas Rodríguez, Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería eléctrica y electrónica. Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely, Professor E^3T UIS

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de sistemas fotovoltaicos (FV) se ha consolidado como una de las alternativas de mayor uso dentro de las energías renovables. Esto debido a que se ha mejorado la eficiencia en la conversión de las celdas FV, hay mayor diversidad de paneles en el mercado (mono y policristalinas, silicio amorfo, flexibles y orgánicas) y el número de fabricantes ha aumentado considerablemente, trayendo consigo un aumento de la competencia, calidad y reducción en los precios de los paneles.^{1 2 3}.

Los generadores FV tienen la capacidad de transformar la luz emitida por el sol, en energía eléctrica que permite alimentar una aplicación específica. Estos, están formados por paneles FV conectados en serie (Strings) y en paralelo (Array) que generan la tensión y corriente que necesita una aplicación.⁴ Típicamente los paneles FV están formados por uno o más módulos conectados en serie. A su vez, cada módulo está formado por un conjunto de celdas FV conectadas en serie junto a un diodo de protección conectado en antiparalelo denominado diodo de bypass⁵.

-
- ¹ Mehmet Sait Cengiz y Mehmet Salih Mamiş. "Price-efficiency relationship for photovoltaic systems on a global basis". En: International Journal of Photoenergy 2015 (2015). DOI: 10.1155/2015/256101.
- ² Ran Fu y col. "U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017 U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017". En: Nrel September (2017). DOI: 10.2172/1390776.
- ³ REN21. Renewables 2017: global status report. Vol. 72. October 2016. 2017, págs. 1256-1270. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.082.
- ⁴ Nicola. Pearsall. The performance of photovoltaic (PV) systems : modelling, measurement and assessment. 2017, pág. 348. DOI: 10.1016/B978-1-78242-336-2.09987-0.
- ⁵ Roger A. Messenger y Jerry Ventre. Photovoltaic systems engineering. 2004, pág. 123. DOI: 10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C. arXiv: arXiv:1011.1669v3.

En un panel FV, los módulos pueden operar bajo diferentes condiciones de operación o mismatching. Esto se puede dar por factores internos como el desgaste, mal funcionamiento de las celdas, daños internos o por factores externos como las sombras producidas por objetos o suciedad que se puede acumular sobre la superficie del panel y que afecta directamente la irradiancia que incide en las celdas de los módulos. Cuando esto ocurre; la corriente que produce un módulo se reduce al valor de corriente de la celda con menor producción de corriente. Si cada uno de los módulos de un panel, presentan diferentes condiciones de operación, las corrientes que produce cada módulo pueden ser diferentes. Además, la corriente máxima que puede entregar un módulo es su corriente de cortocircuito (I_{sc}); por lo tanto, si la corriente del panel (I) es mayor a la corriente I_{sc} de uno de los módulos, la diferencia entre I e I_{sc} fluirá por el diodo de bypass del módulo que produzca esta diferencia. De esta forma se evita limitar la corriente del panel, a la corriente del módulo con menor I_{sc} . Sin embargo, la activación de los diodos de bypass conlleva a la aparición de puntos de inflexión en la curva de corriente vs. tensión (I-V), la presencia de estos puntos produce múltiples puntos de máxima potencia (MPP) en las curvas de potencia vs. tensión (P-V) de un panel FV. Los múltiples MPP pueden reducir significativamente la potencia y la energía entregada por un panel y acelerar su degradación. Por lo tanto, los diodos de bypass juegan un papel importante en el comportamiento de un panel FV ^{6 7}.

Para simular un panel o un arreglo fotovoltaico es necesario contar con el modelo de

⁶ Huiying Zheng y col. "Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations". En: Renewable Energy 68 (2014), págs. 58-66. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.025.

⁷ Katherine A. Kim y Philip T. Krein. "Reexamination of Photovoltaic Hot Spotting to Show Inadequacy of the Bypass Diode". En: IEEE Journal of Photovoltaics 5.5 (2015), págs. 1435-1441. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2444091.

cada módulo como unidad básica del panel, así como los parámetros de dicho modelo. En la literatura existen modelos que permiten simular un módulo FV: el modelo ideal, el modelo de un solo diodo y el modelo de dos diodos. Estos modelos permiten reproducir el comportamiento eléctrico de un módulo FV ⁸. Sin embargo, a estos modelos se les debe incluir el modelo del diodo de bypass, para así, tener un modelo completo del módulo FV. Con estos modelos se busca determinar los parámetros de estos, para así, reproducir el comportamiento de los paneles en funcionamiento, diagnosticar el estado de estos o proponer técnicas y procedimientos que mejoren la extracción de potencia de los paneles.

Al incluir el diodo de bypass en los modelos del módulo FV, este también debe ser representado a través de un modelo. En la literatura se encuentran diferentes aproximaciones para modelar los diodos de bypass: el modelo ideal, el modelo lineal a tramos y modelo exponencial. El modelo más simple para aproximar el diodo de bypass es representarlo como un interruptor ideal ⁹; no obstante, dicha representación no considera las caídas de tensión que se producen en dichos diodos cuando están activos y los efectos que estos tendrían en el modelo del panel. Otra representación es el modelo lineal a tramos, donde el diodo se representa por una fuente de tensión constante, una resistencia en serie y un interruptor ideal ⁹.

Tanto el modelo lineal a tramos como el modelo del diodo ideal requieren conocer el punto de operación (i.e. tensión y corriente) del módulo FV donde el diodo se activa,

⁸ Nicola Femia y col. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. 2012, págs. 1-33. DOI: 10.1201/b14303-2.

⁹ Robert L Boylestad y Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory. 2012, pág. 927. DOI: 10.1111/j.1728-4465.2014.00390.x.

lo cual complica su uso para modelar un panel FV ^{10 11}. Por otro lado, el modelo exponencial del diodo utiliza la ecuación de Schottky, esta describe el comportamiento del diodo en el primer y segundo cuadrante. Este modelo es más exacto que el modelo ideal y el lineal a tramos y no requiere conocer el punto de operación donde el diodo de bypass se activa; sin embargo, es una ecuación no lineal y a su vez más compleja debido a la no linealidad comentada anteriormente.

Dependiendo del modelo que se use, se requerirán más o menos parámetros para describir el comportamiento del diodo. En el modelo lineal a tramos se requiere conocer el valor de la fuente de tensión constante que está dado por el punto de operación del módulo FV y la resistencia serie. En el modelo exponencial se requieren de dos parámetros que están determinados por la ecuación de Shockley, i.e corriente de saturación inversa I_{sat} y el factor de idealidad η .

Hasta el momento no se ha encontrado en la literatura un procedimiento que permita estimar los parámetros de un diodo de bypass dentro de un panel FV. Sin embargo, en la literatura se encuentra información relacionada con este tema, específicamente enfocada a la estimación de los parámetros de un módulo FV, procedimientos para identificar daños en los diodos de bypass y métodos para la estimación de parámetros en diodos Schottky, siendo estos últimos los diodos que más se utilizan como diodos de bypass.

¹⁰ J. D. Bastidas y col. “A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed”. En: Electric Power Systems Research 96 (2013), págs. 81-90. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.10.020.

¹¹ G. Petrone y C. A. Ramos-Paja. “Modeling of photovoltaic fields in mismatched conditions for energy yield evaluations”. En: Electric Power Systems Research 81.4 (2011), págs. 1003-1013. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.12.008.

En ¹² se presenta un compendio de diferentes técnicas para la extracción de los parámetros de los modelos de uno y dos diodos de un módulo FV. El artículo muestra que algunas técnicas permiten estimar todos los parámetros del modelo, es decir, cinco para el modelo de un solo diodo y siete para el modelo de dos diodos. Otras técnicas realizan simplificaciones en los modelos para encontrar expresiones determinísticas para uno o más parámetros y proponen ecuaciones o procedimientos iterativos para encontrar los parámetros restantes ¹³.

También existen algunos procedimientos donde se realizan simplificaciones para calcular todos los parámetros de forma determinística ¹⁴. No obstante, en las técnicas presentadas en las diferentes referencias no se tiene en cuenta el diodo de bypass de los módulos, pues se considera únicamente el conjunto de celdas conectadas en serie sometidas a condiciones de irradiancia constantes que producen una curva I-V que no presenta los efectos de la activación de los diodos de bypass (puntos de inflexión, puntos máximos locales).

Por otro lado, existen artículos que se enfocan en diferentes aspectos de los diodos de bypass, pero no en la estimación de sus parámetros. Por ejemplo, en ¹⁵ se observa el

¹² Ali M. Humada y col. “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016), págs. 494-509. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.051.

¹³ Mohamed B.H. Rhouma y col. “A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model”. En: *Renewable Energy* 113 (2017), págs. 885-894. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.064.

¹⁴ J. Accarino y col. “Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model”. En: *4th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2013* (2013), págs. 62-66. DOI: 10.1109/ICCEP.2013.6586967.

¹⁵ Narendra Shiradkar y col. “Effect of shading on the switching of bypass diodes in PV modules”. En: 9179 (2014), pág. 91790C. DOI: 10.1117/12.2062470.

efecto del sombreado en la conmutación de los diodos de bypass y como esto afecta el rendimiento del panel FV en variables como la tensión de circuito abierto, la corriente de cortocircuito, el punto de máxima potencia y el factor de llenado. En ¹⁵ ¹⁶ los autores proponen modelos para estimar la ocurrencia de las fallas que se originan en los diodos de bypass, esto debido a que se ha evidenciado que los diodos de bypass fallan en gran proporción en comparación a los demás daños que se presentan en un panel FV ¹⁷. En ¹⁸ los autores proponen un método para detectar los diodos de bypass defectuosos a partir de las pérdidas en la potencia, la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. El artículo muestra un sistema basado en lógica difusa que determina cuando un diodo está defectuoso (circuito abierto); sin embargo, es un sistema invasivo ya que, para conocer el estado del diodo, se debe acceder a él por medio de la caja de conexiones del panel.

Si bien existen trabajos enfocados al estudio del diodo de bypass, no se observan en la literatura trabajos donde estimen los parámetros de los diodos dentro de un panel FV. En la literatura se encuentran trabajos donde se estiman los parámetros de los diodos Schottky, que son los que más se usan como diodos de bypass, pero sin estar incluidos en un módulo FV. En¹⁹ se propone un método en el que a partir de las características

¹⁶ Narendra Shiradkar, Vivek Gade y Kalpathy Sundaram. “Predicting service life of bypass diodes in photovoltaic modules”. En: 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015 (2015). DOI: 10.1109/PVSC.2015.7355606.

¹⁷ M. Köntges y col. Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014, págs. 1-140. DOI: 978-3-906042-16-9.

¹⁸ By Mahmoud Dhimish y col. “Detecting Defective Bypass Diodes in Photovoltaic Modules using Mamdani Fuzzy Logic System”. En: (2017).

¹⁹ R. O. Ocaya. “A current-voltage-temperature method for fast extraction of schottky diode static parameters”. En: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation 49.1 (2014), págs. 246-255. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.11.059.

de corriente-voltaje a diferentes temperaturas se pueden estimar los parámetros de los diodos Schottky. En²⁰ se plantea un método analítico para la extracción de los parámetros haciendo uso del modelo a baja frecuencia del diodo. En²¹ se hace la extracción de los parámetros usando la función Lambert W para la ecuación implícita del diodo.

En este documento se presentan dos procedimientos no invasivos para determinar los parámetros del modelo exponencial de un diodo de bypass en un panel FV con N_m módulos. Los procedimientos están planteados para ser usados cuando por factores internos o externos en el panel, la corriente que produce un módulo se vuelve aproximadamente cero ($I_m \approx 0$), o cuando la corriente de uno de los módulos es menor a la corriente que producen los módulos restantes del panel, sin llegar a ser cero. Dicho modelo cuenta con dos parámetros, corriente de saturación inversa $I_{sat,db}$ y factor de idealidad η_{db} , que se pueden obtener a partir de una curva I-V del diodo de bypass.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: el capítulo 1 muestra el marco referencial utilizado en este libro. Los dos procedimientos propuestos para estimar los parámetros del diodo de bypass, se explican en el capítulo 3, en el capítulo 4 se realiza la validación de los procedimientos propuestos por medio de simulaciones en Simulink; en el capítulo 5 se presenta la validación experimental del procedimiento en un panel real bajo condiciones de irradiancia alta, media y baja, cuando la corriente que produce un módulo sombreado es aproximadamente cero. El documento finaliza con los capítulos 6 y 7 donde se expresan las conclusiones y los trabajos futuros, respectivamente.

²⁰ Aik Yean Tang y col. “Analytical extraction of a schottky diode model from broadband S-parameters”. En: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 61.5 (2013), págs. 1870-1878. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2251655.

²¹ W. Jung y M. Guziewicz. “Schottky diode parameters extraction using Lambert W function”. En: Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology 165.1-2 (2009), págs. 57-59. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.02.013.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Proponer una metodología no invasiva, para la estimación de parámetros del diodo de bypass de un módulo fotovoltaico con celdas policristalinas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar un modelo que permita simular el funcionamiento del módulo fotovoltaico con celdas policristalinas incluyendo el diodo de bypass. (Ver Figura 2)
- Proponer un método no invasivo para estimar parámetros del diodo de bypass del modelo identificado en el objetivo específico 1. (Ver Sección 3.1 y 3.2)
- Validar el método propuesto para la estimación de parámetros del diodo de bypass por medio de simulaciones. (Ver Capítulo 4)
- Validar experimentalmente el método propuesto para la estimación de parámetros del diodo de bypass con un panel fotovoltaico real. (Ver Capítulo 5)

2. MARCO REFERENCIAL

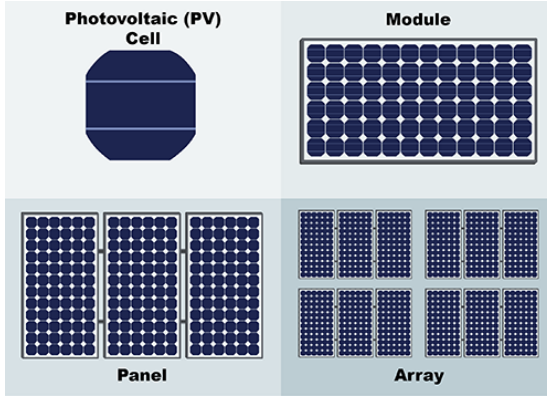
Para conocer el contexto en el que se desarrolla el presente trabajo de investigación, en este capítulo se muestra el marco de referencia con la teoría necesaria para entender el desarrollo del proyecto. Además, se explicará el modelo circuital de un módulo FV y como estos se asocian para formar un panel FV. También, se muestran los efectos que producen las sombras en los comportamientos de los módulos, el diodo de bypass y el panel en general.

2.1. CELDAS Y MÓDULOS PV

La celda FV es la unidad más pequeña de generación fotovoltaica y dependiendo de como se agrupe puede dar lugar a módulos, paneles y arreglos fotovoltaicos. En la Figura 1, (tomado de ²²), se puede apreciar cómo se agrupan las celdas para obtener diferentes estructuras.

²² Florida Solar Energy Center. Cells, Modules, and Arrays. 2018.

Figura 1. Celdas, módulos, paneles y arreglos FV

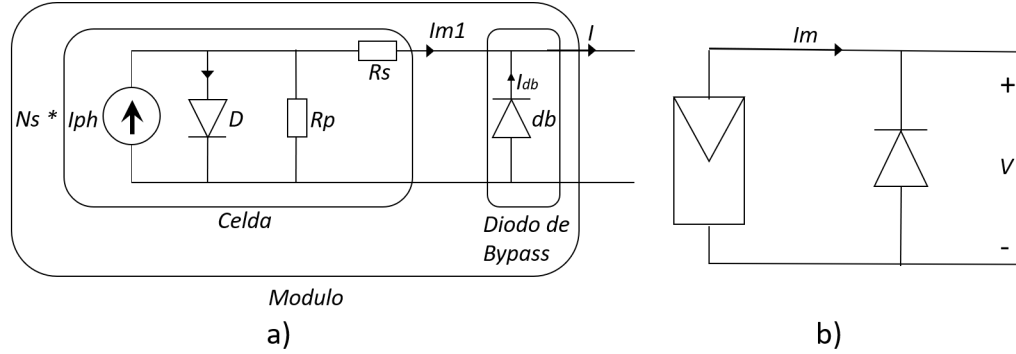


Fuente: 22.

Según la Figura 1, un módulo FV es la unión de dos o más celdas FV conectadas en serie junto a un diodo de bypass conectado en antiparalelo. Para representar el comportamiento eléctrico de un módulo, se puede utilizar el modelo de la celda FV y escalarlo según el número de celdas que estén agrupadas en el módulo. Existen modelos en la literatura que se utilizan según el grado de complejidad y exactitud que se requiera: el modelo ideal, el modelo de un diodo y el modelo de dos diodos son los más utilizados⁸²³. En este trabajo se optó por utilizar el modelo de un solo diodo, porque ofrece un compromiso entre complejidad y exactitud. En la Figura 2a se observa el modelo de un módulo FV compuesto por un conjunto de celdas FV conectadas en serie N_c junto a un diodo de bypass conectado en antiparalelo, donde las celdas FV se representan con el modelo de un solo diodo. Una representación simplificada del módulo FV se muestra en la Figura 2b.

²³ Giovanni Petrone, Carlos Andrés Ramos-Paja y Giovanni Spagnuolo. Photovoltaic Sources Modeling. 2017, págs. 1-19. DOI: 10.1002/9781118755877.ch1.

Figura 2. Modelo y simplificación circuital de un módulo



En el modelo de la Figura 2a la fuente I_{ph} representa la corriente generada a través del efecto fotovoltaico, la cual depende principalmente de la irradiancia; el diodo representa el comportamiento no lineal de las uniones P - N de las celdas, las resistencias R_s y R_p representan las pérdidas producto de las conexiones entre celdas, y las pérdidas presentes por corrientes de fugas respectivamente. El modelo lo completa un diodo de bypass (db) que es un elemento externo al módulo y el cual solo se activa cuando el módulo se encuentra operando bajo condiciones irregulares.

A partir del modelo de la Figura 2a, y utilizando la ley de corriente de Kirchhoff, se obtiene la ecuación (1) que expresa la corriente de salida de un módulo (I), donde V es el voltaje de salida del módulo, I_{sat} es la corriente de saturación del diodo D , η es el factor de idealidad del diodo D , V_t es el voltaje térmico del diodo D e I_{db} es la corriente que circula por el diodo de bypass. A su vez el voltaje térmico en el diodo D se define como $V_t = (k \cdot \frac{T}{q})$, donde k es constante de Boltzmann, q la carga de electrón y T es la temperatura de las celdas en K.

La corriente del diodo de bypass I_{db} se define en (2) donde $I_{sat,db}$ y η_{db} son la corriente de saturación inversa y el factor de idealidad del diodo de bypass, respectivamente. El voltaje térmico del diodo de bypass se define como $V_{t,db} = (k \cdot \frac{T_{db}}{q})$, donde T_{db} es la

temperatura del diodo de bypass. En este trabajo se asume que la temperatura en las celdas y el diodo de bypass son la misma, para simplificar el procedimiento, esto debido a que los módulos FV no experimentan cambios rápidos en la irradiancia ²⁴.

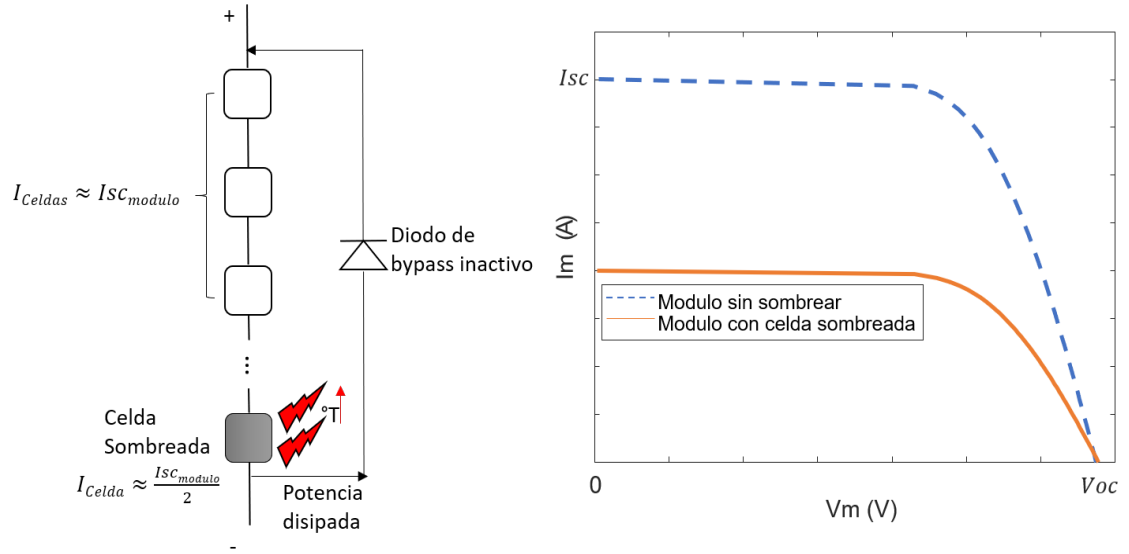
$$I = I_{ph} - I_{sat} \cdot \left(e^{\frac{V + (I - I_{db}) \cdot R_s}{N_s \cdot \eta \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V + (I - I_{db}) \cdot R_s}{R_p} + I_{db} \quad (1)$$

$$I_{db} = I_{sat,db} \cdot \left(e^{\frac{-V}{\eta_{db} \cdot V_{t,db}}} - 1 \right) \quad (2)$$

Cuando en un solo modulo se presentan condiciones irregulares de irradiancia, y una o varias celdas del módulo son sombreadas parcial o totalmente. Se presenta una reducción parcial o total de la corriente de cortocircuito del módulo. Esta reducción en la corriente lleva consigo un aumento en la temperatura en las celdas sombreadas, debido a la corriente de las celdas que no se encuentran sombreadas.

²⁴ Suk Whan Ko y col. “Electric and thermal characteristics of photovoltaic modules under partial shading and with a damaged bypass diode”. En: Energy 128 (2017), págs. 232-243. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.030.

Figura 3. Comportamiento del módulo ante la sombra

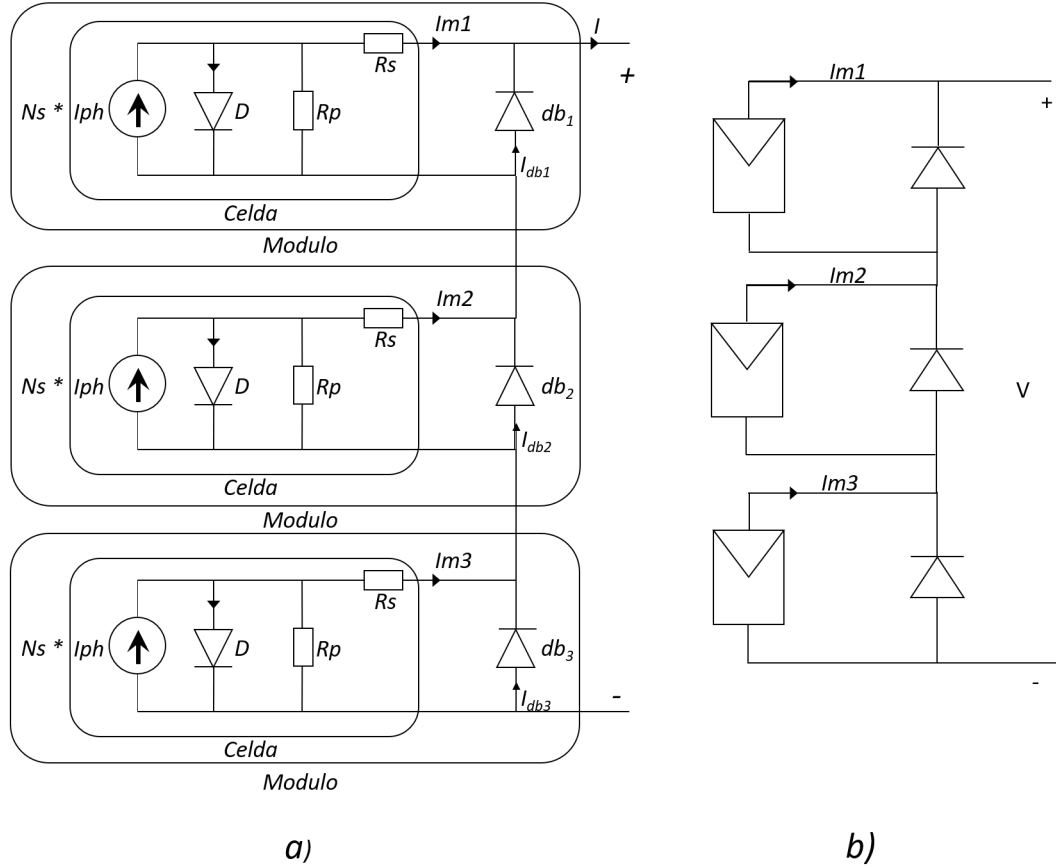


En la Figura 3 se puede apreciar que, ante las condiciones irregulares de operación, el módulo reduce su corriente de cortocircuito. Además, no se evidencia la activación del diodo de bypass y en la celda sombreada hay un aumento de temperatura proveniente de la corriente de las celdas que no se encuentran sombreadas en el módulo que circula por la celda afectada provocando una disipación de potencia.

2.2. PANELES PV

Un panel FV es la conexión en serie de dos o más módulos; este puede ser representado bajo el modelo de un módulo, pero teniendo en cuenta que las tensiones de salida del panel son mayores a la del módulo por lo que se comentó anteriormente. Un modelo con el que se pueda representar un panel FV se puede apreciar en la Figura 4a.

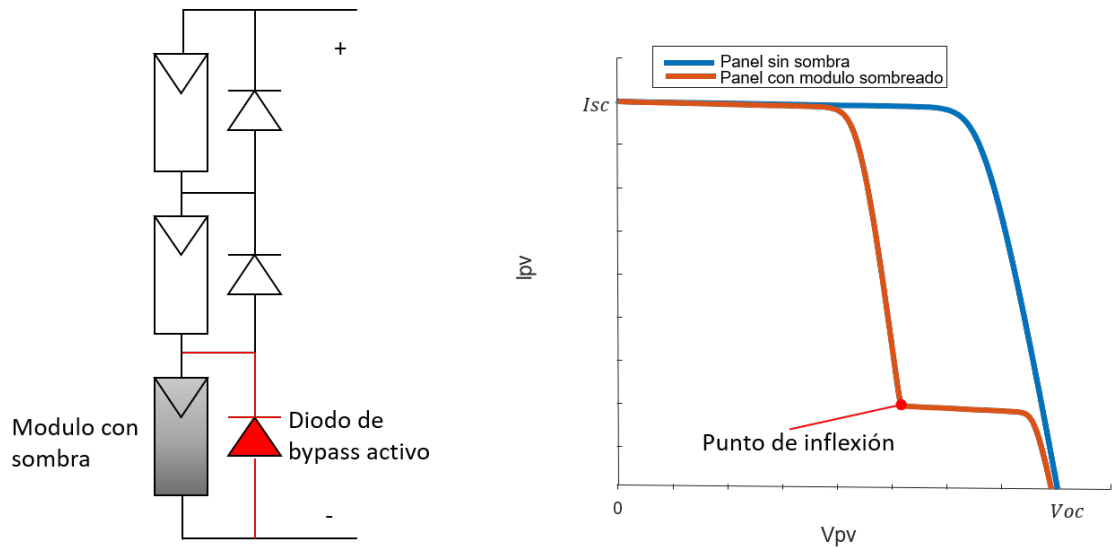
Figura 4. Modelo y simplificación circuital de un panel FV de tres módulos.



En la Figura 4a se puede apreciar cómo están conectados los módulos para formar un panel FV. La corriente del panel (I) es común a todos los módulos por estar conectados en serie; por lo tanto, I se forma sumando la corriente de los módulos (I_m) y la corriente del diodo de bypass respectivo (I_{db}). Cuando todos los módulos se encuentran bajo las mismas condiciones de operación (Irradiancia, temperatura), los módulos generan el mismo valor de corriente I_m . Cuando esto no ocurre y uno o varios módulos se encuentran bajo diferentes condiciones de irradiancia o temperatura con respecto a los demás módulos del panel, las corrientes de estos módulos son diferentes a la del resto de módulos en el panel.

En un panel bajo condiciones irregulares de irradiancia producidas por sombras o suciedad, se presentará una reducción en la corriente de salida del panel. Sumado a esto, se presentará la activación del o los diodos de bypass de los módulos que estén afectados por la baja irradiancia. En la curva I-V del panel aparecerán puntos de inflexión producto de la activación de los diodos de bypass, que estarán dados por el número de módulos en el panel que se encuentren bajo condiciones de irradiancia irregular. Estos puntos de inflexión llevan consigo la aparición de múltiples puntos locales de máxima potencia, afectando con esto la potencia total que puede producir el panel. En la Figura 5 se puede apreciar como la corriente de un panel se comporta al someter uno de sus módulos a condiciones de irradiancia irregular.

Figura 5. Comportamiento del panel ante la sombra.



En la Figura 5, se aprecia que el módulo con sombra presenta la activación del diodo de bypass, estos se activan para desviar el excedente de corriente proveniente de los módulos que no se encuentran bajo las condiciones irregulares.

Si por alguna razón uno o más módulos dentro del panel no presentan un diodo de

bypass conectado a sus terminales, y el panel es sometido a condiciones irregulares de operación, se presentará una disipación de potencia en los módulos que no posean diodos de bypass. Esta disipación se debe a que los módulos afectados son forzados a trabajar en el segundo cuadrante trayendo consigo un aumento en su temperatura. Esta disipación de potencia lleva a la aparición de puntos calientes (hot spots) en el panel, que con el tiempo producen un daño en las celdas del panel.

El diodo de bypass reduce la disipación de potencia en un módulo sombreado, ya que ofrece un camino por donde el excedente de corriente proveniente de los otros módulos del panel puede circular y permite que los módulos afectados trabajen en el primer cuadrante. La protección que ofrece el diodo de bypass está sujeta a la temperatura a la que se encuentre operando y el tiempo que dure el sombreado sobre el panel, esto debido a que se acorta la vida útil del diodo de bypass por la exposición prolongada o repetición de eventos de sombreado sobre el panel.

3. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DIODO DE BYPASS

En este capítulo se muestran los procedimientos propuestos para estimar los parámetros de un diodo de bypass en un panel FV, estos son: $I_{sat,db}$ y η_{db} . Para la construcción de los procedimientos se tuvieron en cuenta las siguientes restricciones: los paneles FV deben tener como mínimo dos módulos, los procedimientos solo pueden determinar los parámetros de un diodo de bypass a la vez, se asume que las celdas del panel poseen parámetros iguales para facilitar los cálculos y se deben tomar dos curvas I-V (curva A y curva B) en el menor tiempo posible para que las condiciones de operación (irradiancia y temperatura) sean las mismas para las dos curvas.

En este capítulo, se presentan también dos procedimientos para estimar los parámetros de los diodos de bypass. El primer procedimiento se realiza, cuando la corriente del módulo I_m , en el que se desea conocer los parámetros del diodo de bypass es prácticamente cero, y el segundo cuando la corriente del módulo es diferente de cero y se presenta en la curva IV del panel, un punto de inflexión.

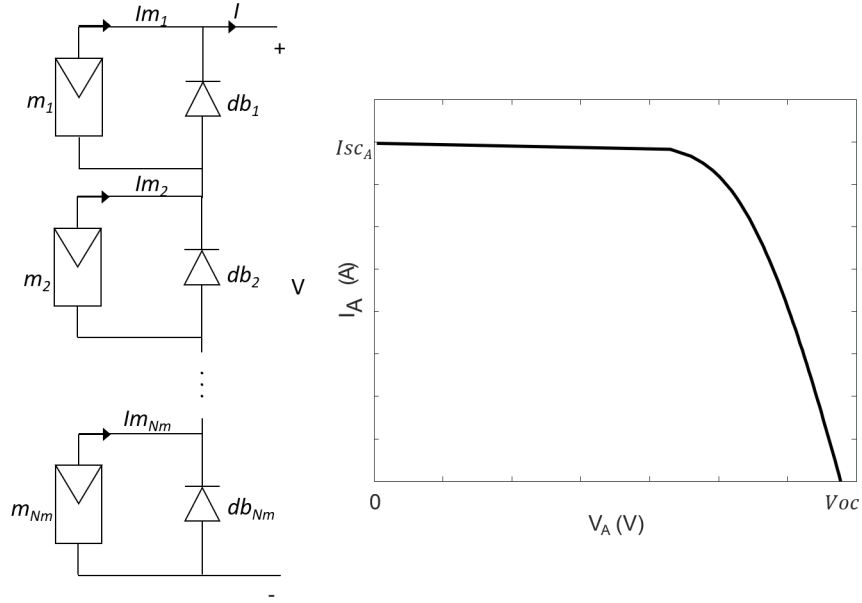
3.1. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO EXISTE SOMBRA TOTAL EN EL MÓDULO

En esta sección se muestra el procedimiento para extraer los parámetros del diodo de bypass, cuando la corriente de uno de los módulos del panel es aproximadamente cero, debido a una sombra total sobre el módulo.

Antes de comenzar como tal el procedimiento, se requiere conocer el número de mó-

dulos que posee el panel N_m . Luego, como primer paso, se procede a medir N datos de la curva I-V del panel bajo condiciones regulares de irradiancia (curva A), es decir que todos los módulos del panel se encuentren bajo la misma irradiancia. Para medir la curva A, se debe realizar un barrido de corriente que comience en 0A (circuito abierto) y termine en la corriente de corto circuito (I_{sc}) del panel, la separación que habrá entre un dato y otro estará determinada por la razón existente entre la corriente de cortocircuito del panel y el número de datos que se tomen. Esta separación se representa por la variable $\Delta I = \frac{I_{sc}}{N_m}$. Tras hacer el barrido, se obtienen los vectores $I_A(i)$ y $V_A(i)$, donde $i = 1 \dots N$. La figura 6 muestra el modelo circuital de un panel con N_m módulos en condiciones regulares y su curva I-V característica (Curva A).

Figura 6. Panel con N_m módulos y su curva I-V.



Luego de obtener la curva A, se procede a cubrir totalmente uno de los módulos del panel y realizar la medición de N datos de la curva I-V utilizando el mismo barrido de corriente que se realizó para medir la curva A (i.e. de 0A hasta I_{scB} con incrementos

de ΔI), esto con el fin de garantizar que la curva A y la nueva curva (curva B) tengan los mismos valores de corriente ($I_B = I_A$), y así facilitar los siguientes pasos del procedimiento. De esta forma se obtienen los vectores de corriente y tensión de la Curva B: $I_B(i)$ y $V_B(i)$, donde $i = 1 \dots N$. Es importante mencionar que se debe cubrir el módulo y obtener la curva B en el menor tiempo posible, para que la irradiancia y la temperatura sean prácticamente iguales en las curvas A y B.

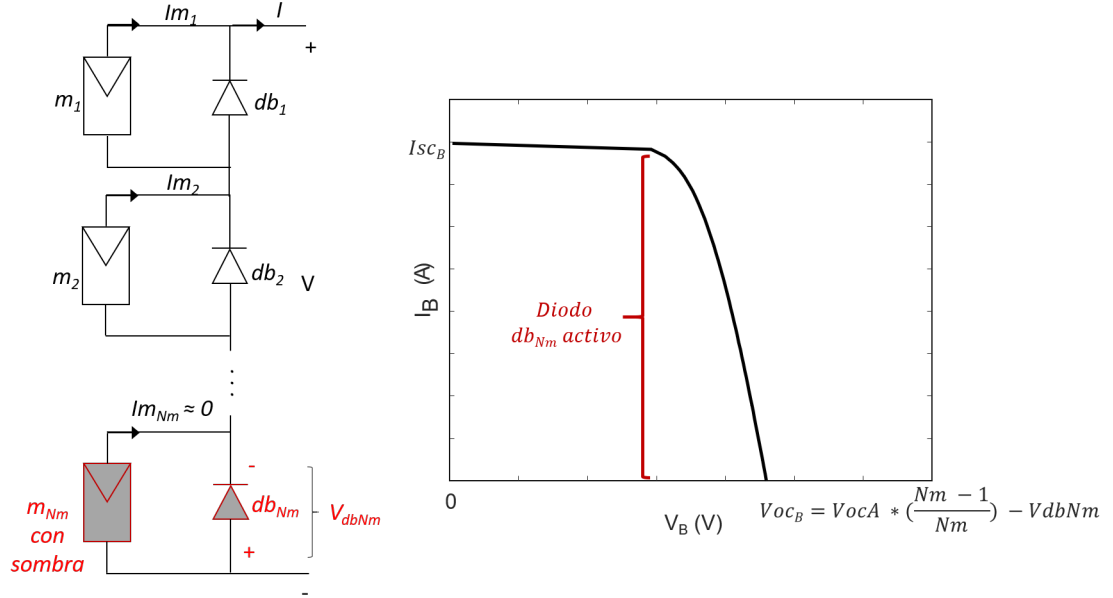
Al cubrir totalmente un módulo la corriente que este produce es aproximadamente cero ($I_m \approx 0$). Por lo tanto, en el módulo sombreado toda la corriente del panel fluirá por el diodo de bypass ($I_{db}(i) \approx I_B(i) = I_A(i)$). Por esta razón, la tensión de la curva B se puede relacionar con la tensión de la curva A utilizando la ecuación (3) que propone el autor, donde el factor $\frac{N_m-1}{N_m}$ representa la tensión de los módulos no sombreados y $V_{db_{N_m}}(i)$ es la tensión del diodo de bypass activo en el módulo sombreado.

$$V_B = V_A(i) \cdot \frac{N_m - 1}{N_m} - V_{db_{N_m}}(i), \quad i=1 \dots N \quad (3)$$

$$V_{db_{N_m}} = \eta_B \cdot V_{t,db} \cdot \ln \left(\frac{I_{db_{N_m}}(i)}{I_{sat,db}} + 1 \right), \quad i=1 \dots N \quad (4)$$

La Figura 7 muestra el modelo circuital de un panel con el módulo N_m totalmente cubierto, y su curva I-V (Curva B). Se puede apreciar en la imagen que el módulo de contorno rojo es el módulo en el que se introduce la sombra, por lo tanto, el diodo de bypass asociado a este módulo se activa y es el que se desea caracterizar.

Figura 7. Panel con el módulo N_m sombreado y su curva I-V.



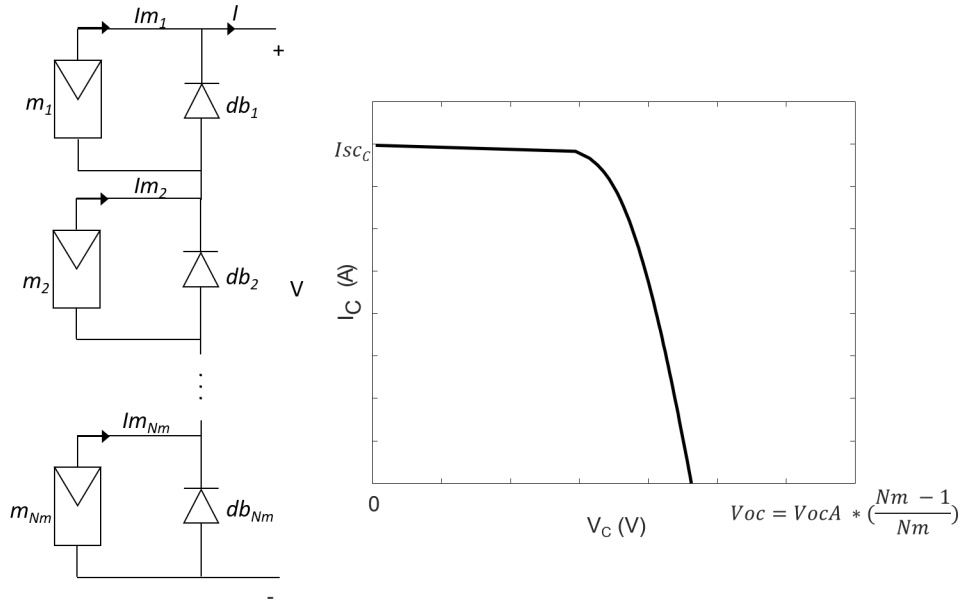
Después de realizar las mediciones de las curvas A y B, se debe estimar la curva I-V del panel sin el módulo sombreado (Curva C), es decir, la curva I-V de un panel formado por $N_m - 1$ módulos sin sombrear. Los valores de corriente de la curva C (I_C) son iguales a las corrientes de la curva A, como se muestra en la ecuación (5), ya que la corriente de un panel no depende del número de módulos activos sino del área de sus celdas ²⁵. Los valores de tensión de la curva C (V_C) se pueden calcular escalando las tensiones de la curva A de manera proporcional al número de módulos no sombreados como se muestra en la ecuación (6). El modelo circuital de un panel con $N_m - 1$ módulos activos y su curva I-V se muestra en la Figura 8.

²⁵ MariaCarmela Di Piazza y Gianpaolo Vitale. Photovoltaic Sources: Modelling and Emulation. 2013, pág. 296. DOI: 10.1007/978-1-4471-4378-9.

$$I_C = I_A(i), i=1 \dots N \quad (5)$$

$$V_C = V_A \cdot \frac{N_m - 1}{N_m}, i=1 \dots N \quad (6)$$

Figura 8. Panel con $N_m - 1$ módulos y su curva I-V.



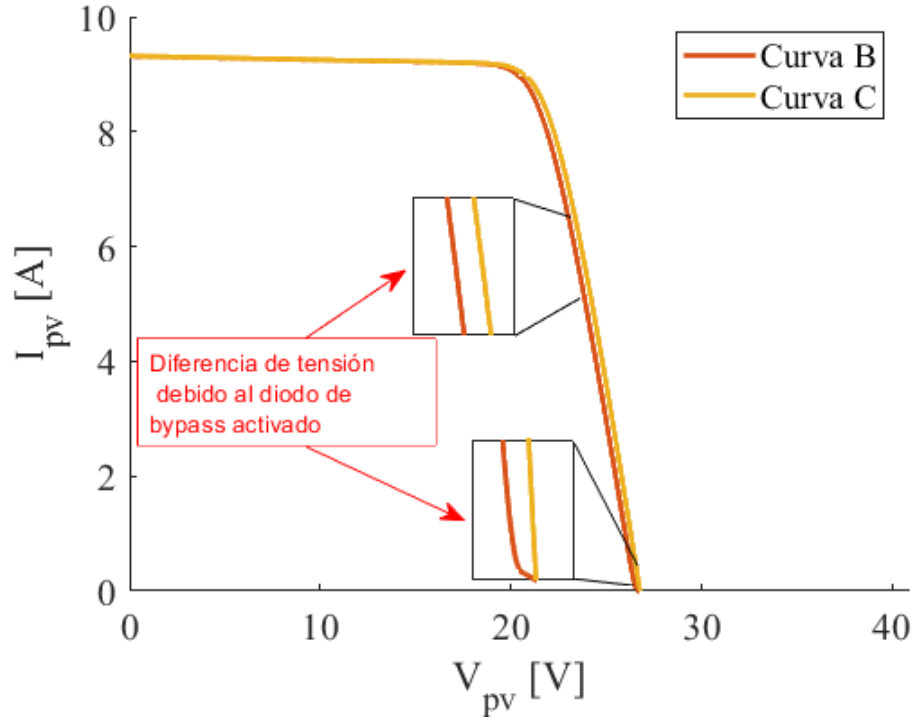
Si se compara el modelo circuital de la Figura 7 con el modelo de la Figura 8, se puede apreciar que la diferencia entre ambos modelos es el diodo de bypass activo del módulo sombreado de la Figura 7. La activación del diodo de bypass produce una caída de tensión en la curva B con respecto a la curva C como se muestra en la Figura 9. Entonces, si se restan punto a punto las tensiones de la curva B de las tensiones de la curva C para un mismo valor de corriente, es posible estimar el vector de tensiones del diodo de bypass del módulo sombreado ($V_{db_{Nm}}$), como se muestra en la ecuación (7). Por otro lado, según el modelo circuital de la Figura 7, la corriente del panel atraviesa el diodo de bypass del módulo sombreado, por consiguiente, el vector de corrientes del

diodo de bypass ($I_{db_{Nm}}$) es el mismo de la curva B, como se define en la ecuación (8).

$$V_{db_{Nm}} = V_C(i) - V_B(i), \quad i=1 \dots N \quad (7)$$

$$I_{db_{Nm}} = I_B(i) = I_A(i), \quad i=1 \dots N \quad (8)$$

Figura 9. Diferencia de tensión entre las curvas B y C



$V_{db_{Nm}}$ e $I_{db_{Nm}}$ representan los vectores de tensión y corriente del diodo de bypass, con los cuales se puede graficar la curva I-V del mismo. Con estos vectores se deben seleccionar dos pares ordenados (x_1, y_1) y (x_2, y_2) que, reemplazados en la ecuación de Shockley, generan el sistema de dos ecuaciones no lineales con dos incógnitas mostrado en (9), donde $I_{sat,db}$ y η_{db} son los parámetros a encontrar. En un trabajo futuro de esta investigación, se pueden probar otros métodos de solución para la estimación de los

parámetros. Para así, obtener valores de $I_{sat,db}$ y η_{db} mas cercanos a los valores que normalmente poseen estos parámetros $I_{sat,db}$ en el orden de los microamperios y η_{db} entre 1 y 2.

$$\begin{cases} I_{sat,db} \cdot \left(\exp \left(\frac{x_1}{\eta_{db} \cdot V_{t,db}} \right) - 1 \right) - y_1 = 0 \\ I_{sat,db} \cdot \left(\exp \left(\frac{x_2}{\eta_{db} \cdot V_{t,db}} \right) - 1 \right) - y_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Los dos pares ordenados (x_1, y_1) y (x_2, y_2) se definen como se muestra en las ecuaciones (10) y (11), donde (10) corresponde a los valores de voltaje y corriente, la corriente del diodo de bypass se toma como aproximadamente el 80 % del valor de la corriente del módulo en el punto de máxima potencia (I_{mpp}) del panel. Este criterio de selección se propone debido a que, en una aplicación práctica del método propuesto, es posible que las corrientes de cortocircuito de las curvas A ($I_{sc,A}$) y B ($I_{sc,B}$) no sean exactamente iguales, debido a pequeñas variaciones en la irradiancia cuando se miden ambas curvas. Esas variaciones producen una estimación errónea de los voltajes del diodo de bypass para corrientes cercanas a $I_{sc,A}$ o $I_{sc,B}$; por lo tanto, definiendo el punto (x_1, y_1) para corrientes menores que $I_{mpp,B}$ se evitan errores en la estimación de $I_{sat,db}$ y η_{db} . Por su parte (11) corresponde al punto donde la corriente en el diodo de bypass es aproximadamente la mitad de su valor máximo. Se utiliza el símbolo $\lceil \cdot \rceil$ para denotar la parte entera en el cociente obtenido en la división de $\left(\frac{N}{2}\right)$.

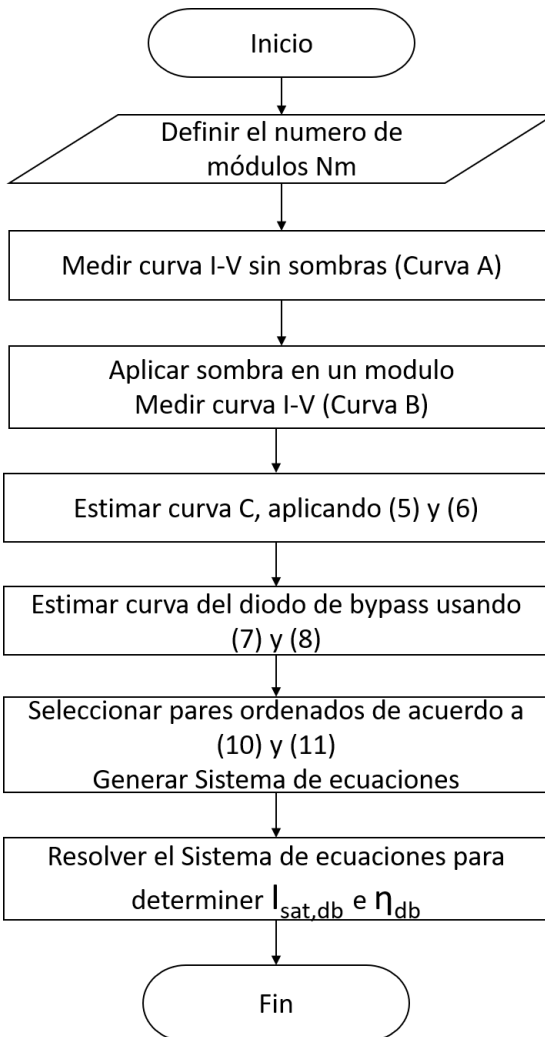
$$(x_1, y_1) = (V_{db_{Nm}}(ind(0.8 \cdot I_{mpp,B})), I_{db_{Nm}}(0.8 \cdot I_{mpp,B})) \quad (10)$$

$$(x_2, y_2) = \left(V_{db_{Nm}} \left(\lceil \frac{N}{2} \rceil \right), I_{db_{Nm}} \left(\lceil \frac{N}{2} \rceil \right) \right) \quad (11)$$

Al solucionar el sistema de ecuaciones se obtiene el valor de los parámetros $I_{sat,db}$ y η_{db} para el módulo sombreado, y con esto se finalizaría el método. Si se desea encontrar

los parámetros del diodo de bypass conectado a otro módulo, se debe repetir este procedimiento sombreando el módulo del que se van a estimar los parámetros del diodo de bypass. Por lo tanto, sombreando consecutivamente los módulos de un panel y aplicando el procedimiento descrito en la Figura 10, es posible estimar los parámetros de todos los diodos de bypass en un panel.

Figura 10. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.



3.1.1. Efectos de los errores en la medición de corriente y tensión. En el procedimiento que se comentó anteriormente, no se tuvieron en cuenta los errores producto de la exactitud de los instrumentos de medición al momento de obtener los valores de corriente y tensión de las curvas A, B y C. Los instrumentos de medición generan un error en los valores medidos, debido a que la exactitud de los instrumentos es limitada y normalmente se encuentra especificada en la hoja de datos del instrumento.

Al medir las curvas A y B, se genera un error en cada valor de los vectores de corriente y tensión; que variará entre un valor mínimo, al medir 0A ó 0V, y máximo, al medir I_{sc} o V_{oc} , que dependerá del valor que se esté midiendo en la curva I-V. Los errores en los vectores de corriente y tensión son dados por las ecuaciones (12), (13) y (14), donde ϵI_A , ϵI_B y ϵI_C ; son los errores en los valores de corriente de los vectores de las curvas A, B y C; $C_{\epsilon I1}$ representa el 0.2 % del valor medido y $C_{\epsilon I2}$ representa el 0.15 % de la escala de medición. Por otro lado, ϵV_A y ϵV_B representan los errores en los vectores de tensión de las curvas A y B; $C_{\epsilon V1}$ representa el 0.02 % del valor medido y $C_{\epsilon V2}$ representa el 0.025 % de la escala de medición. Al estimar la curva C, ϵV_C es el error de los valores de tensión de esta curva. los cuales son $\frac{2}{3}$ de los obtenidos en la curva A, esto debido a que la curva C se estima a partir de la curva A.

$$\epsilon I_A = \epsilon I_B = \epsilon I_C = \pm(C_{\epsilon I1} + C_{\epsilon I2}) \quad (12)$$

$$\epsilon V_A = \epsilon V_B = \pm(C_{\epsilon V1} + C_{\epsilon V2}) \quad (13)$$

$$\epsilon V_C = \frac{2}{3} \cdot \epsilon V_A \quad (14)$$

Cuando se estiman los vectores de corriente y tensión del diodo de bypass, el error de los vectores de las curvas B y C se propaga hacia las corrientes y tensiones del diodo de bypass calculadas con el procedimiento propuesto. Teniendo en cuenta que la tensión

del diodo de bypass se calcula restando las tensiones de la curva B de la curva C, la propagación del error estará determinada por las ecuaciones (15) y (16), donde $\epsilon V_{db_{N_m}}$ es el error que se propaga en cada uno de los valores de tensión del vector de voltajes del diodo de bypass y $\epsilon I_{db_{N_m}}$ es el error que se propaga a cada uno de los valores de corriente del vector $I_{db_{N_m}}$, se puede apreciar que el error en $\epsilon I_{db_{N_m}}$ es el mismo que se obtiene en ϵI_A y ϵI_B , ya que sobre este vector no se realiza una operación posterior que modifique el error.

$$\epsilon V_{db_{N_m}} = \sqrt{(\epsilon V_B)^2 + (\epsilon V_C)^2} \quad (15)$$

$$\epsilon I_{db_{N_m}} = (\epsilon I_A) = (\epsilon I_B) = (\epsilon I_C) \quad (16)$$

3.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO EXISTE SOMBRA PARCIAL EN EL MÓDULO

Las sombras parciales en un módulo de un panel se pueden producir por objetos cercanos al generador FV. Estas se pueden formar de una manera más simple que una sombra total. Ya que solo se requiere de un pequeño objeto ubicado sobre el panel o en la dirección en la que el sol incide sobre el panel para producir una sombra parcial sobre este. Sin embargo, cuando se producen sombras parciales en donde la corriente del módulo sombreado es mayor a cero, $I_{ph} > 0$, el método descrito en la sección anterior no se puede aplicar directamente.

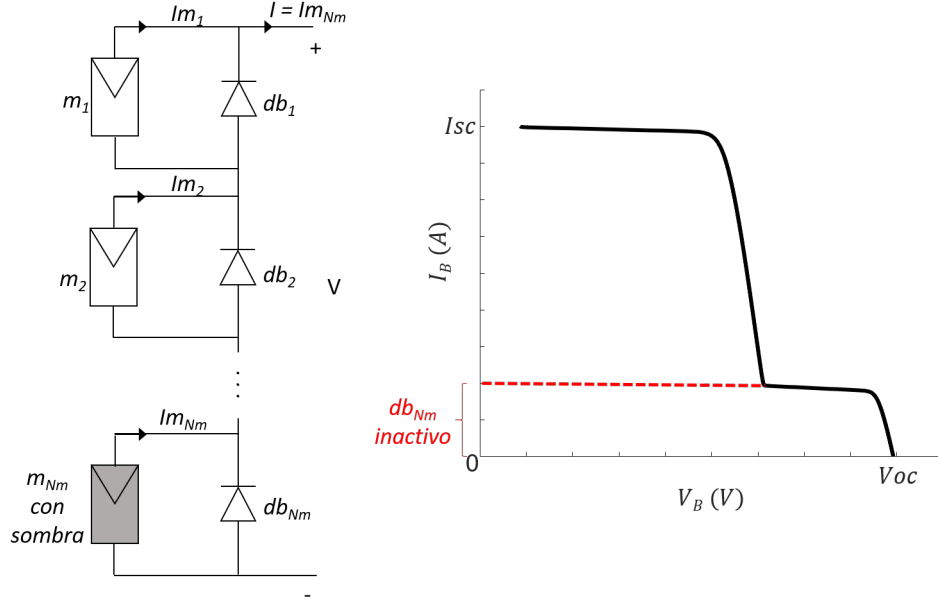
En esta sección se presenta el procedimiento cuando la corriente que produce el módulo I_m se reduce sin llegar a ser cero, producto de una sombra que no cubre totalmente el módulo. Cuando esto ocurre, se origina en la curva I-V del panel un punto de inflexión; este punto indica el valor mínimo de corriente donde el diodo de bypass comienza a conducir.

Para la realización del procedimiento se tendrán en cuenta las mismas consideraciones que se hicieron anteriormente para módulos sombreados totalmente, las cuales son: el procedimiento solo puede determinar los parámetros de un diodo de bypass a la vez, el panel FV debe tener como mínimo dos módulos, se asume que las celdas del panel poseen parámetros iguales para facilitar los cálculos, y que se deben tomar dos curvas I-V (curva A y curva B) en el menor tiempo. Por otro lado, solo se podrá decir que la Curva B es válida si presenta únicamente un punto de inflexión.

El procedimiento se realiza de la siguiente manera: Al determinar el número de módulos que posee el panel N_m , se deben medir las curvas A y B, teniendo en cuenta que la sombra que se introduce en la medición de la curva B no debe ser total, es decir, que la I_{ph} del módulo sombreado es mayor que cero y menor a la I_m de los módulos no sombreados.

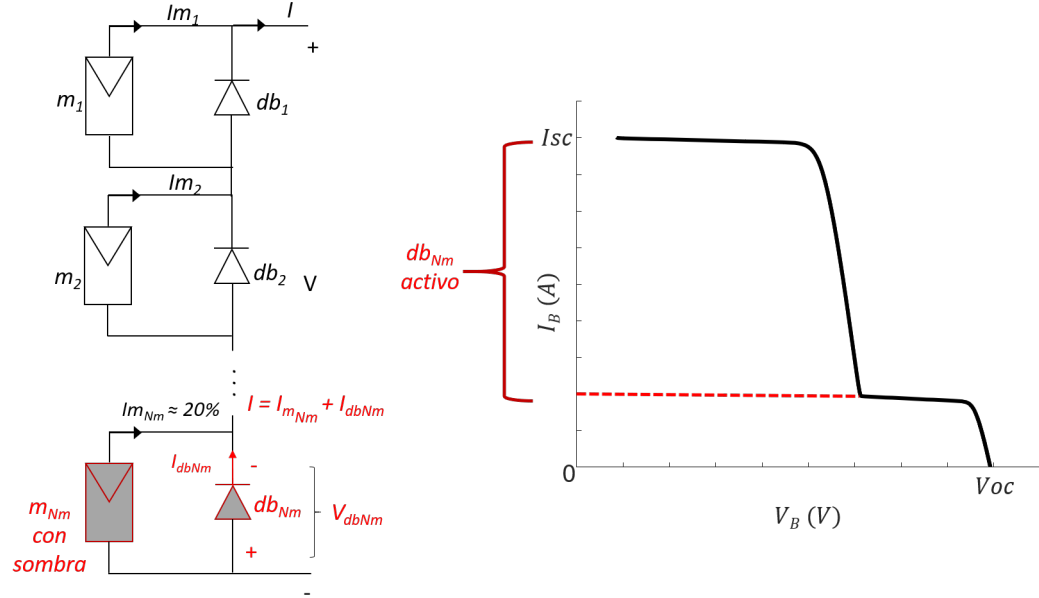
Al sombrear parcialmente un módulo, la curva B tendrá un comportamiento diferente al que se observó en la sección anterior. Esto debido a que el módulo sombreado tendrá comportamientos diferentes a medida que la corriente del panel aumenta. Cuando la corriente del panel es menor a la corriente de cortocircuito del módulo sombreado, $I < I_{sc}$, la corriente del panel será igual a la corriente del módulo sombreado ($I = I_m$) y no se activa el diodo de bypass. La representación circuital de lo expresado se puede ver en la Figura 11, donde se aprecia que para los valores de corriente menores al valor de corriente donde se localiza el punto de inflexión, el módulo sombreado trabaja normalmente y no hay la activación del diodo de bypass.

Figura 11. Panel con módulo sombreado parcialmente y $I < I_{sc}$.



Cuando la corriente del panel es mayor a la corriente del cortocircuito del módulo sombreado, $I < I_{sc}$, la corriente en este último será la suma de la corriente de cortocircuito del módulo más la corriente que circule por el diodo de bypass ($I = I_{sc} + I_{db}$). Entonces, por el módulo sombreado fluirá la porción de la corriente del panel equivalente a la corriente de cortocircuito del módulo sombreado y el excedente fluirá por el diodo de bypass, la Figura 12 muestra como el diodo de bypass se activa para los valores de corrientes mayores a la corriente de cortocircuito del módulo sombreado, que está determinado por el punto de inflexión.

Figura 12. Panel con módulo sombreado, $I > I_{sc}$.



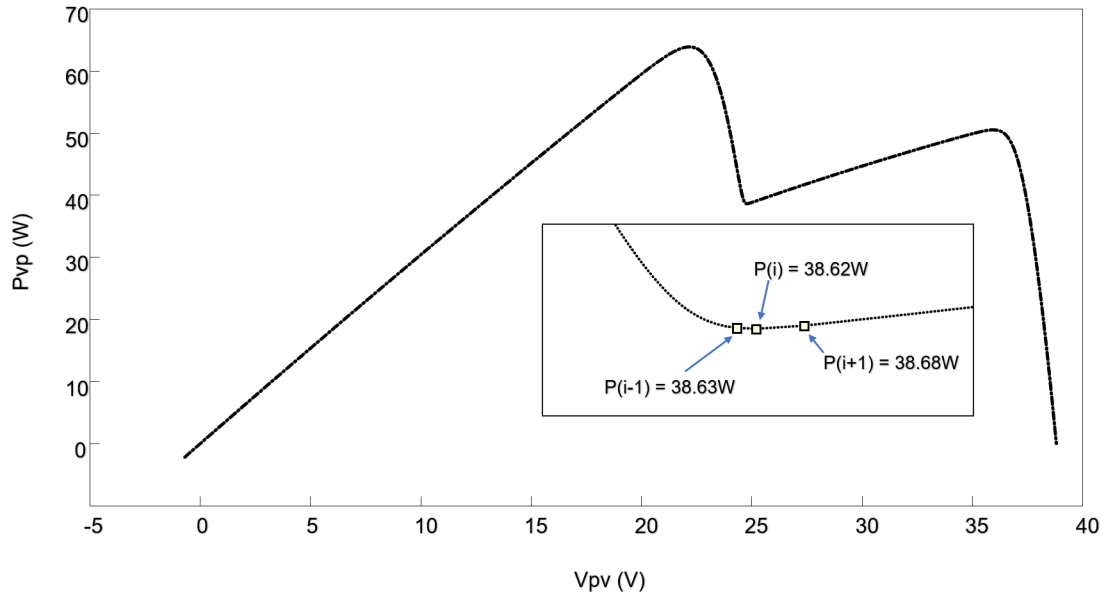
La curva C, se estima a partir de la curva A como se estableció en la sección anterior. Esto debido, a que sin importar el procedimiento que se este realizando se necesita la curva de los $N_m - 1$ módulos no sombreados del panel y esta, solo es puede estimar a partir de la curva A. Esta curva al ser tomada sin sombras en el panel, los módulos se encuentran operativos y aportando los mismos valores de corriente y tensión. Además, al estar los módulos del panel conectados en serie es posible escalar los valores de tensión de la curva A para así, obtener los valores de tensión de la curva C. Tras obtener las curvas A, B y C y teniendo en cuenta que en la curva B existe un punto de inflexión. Se debe localizar dicho punto identificando el índice donde está localizado el punto de inflexión (i_{pi}) en los vectores de tensión y corriente. Para esto, en este trabajo se optó por calcular la curva P-V con los valores de corriente y voltaje de la curva B. El punto de inflexión en la curva de P-V se puede identificar utilizando la ecuación (17), donde P_B es la potencia calculada a partir de I_B y V_B e $i = 1 \dots N$ para localizar el punto de

inflexión.

$$\text{Si } P_B(i-1) > P_B(i) < P_B(i+1), \implies i = i_{pi} \quad (17)$$

Como se comentó anteriormente el punto de inflexión en una curva I-V, es el punto que indica el valor de mínimo de corriente, donde el diodo de bypass de un módulo con condiciones irregulares de operación se activa. Este indica el valor de la corriente de cortocircuito I_{sc} del módulo sombreado. En términos de la ecuación (17) el punto de inflexión es el punto donde la potencia de la curva P-V de un panel deja de decrecer para empezar a crecer, esto se puede apreciar en la figura 13 donde se observa que las potencias antes del punto de inflexión tienen una tendencia decreciente y solo cambian después del punto de inflexión.

Figura 13. Punto de inflexión en una curva P-V.



Tras localizar el punto de inflexión en la curva B, los valores de corrientes y tensiones de las curvas B y C, se deben limitar. Los valores de corrientes van comprendidos entre el

valor de corriente de cortocircuito del panel I_{sc} y el valor de corriente donde se localiza el punto de inflexión. Las tensiones van limitadas desde $0V$ hasta el valor de voltaje donde se localiza el punto de inflexión i_{pi} . Lo anterior, para acotar las curvas solo a la zona en la que el diodo de bypass esta activo.

Tras acotar las corrientes y tensiones de las curvas B y C, a la zona donde el diodo de bypass se encuentra activo. Se puede estimar el vector de tensión del diodo de bypass del módulo sombreado ($V_{db_{Nm}}$). Este vector está determinado por la ecuación (18).

$$V_{db_{Nm}} = V_C(i) - V_B(i), \quad i = 1 \dots i_{pi} \quad (18)$$

A los valores de corriente obtenidos en el vector de corriente I_B , se le deben restar el valor de la corriente de cortocircuito I_{sc} del módulo sombreado $I_{sc_{Nm}}$, o en otras palabras el valor de corriente donde se localiza el punto de inflexión de la curva B. Esto debido a que en el punto de inflexión el diodo de bypass presenta $0V$ y $0A$. Al realizar esta operación se obtiene el valor real de corriente que circula por el diodo de bypass.

$$I_{db_{Nm}} = I_B(i) - I_{sc_{Nm}}, \quad i = 1 \dots i_{pi} \quad (19)$$

Con $V_{db_{Nm}}$ e $I_{db_{Nm}}$ se grafica la curva I-V del diodo de bypass, y a partir de estos datos se deben seleccionar los pares ordenados (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , que se definen como se muestra en las ecuaciones (20) y (21), donde (20) corresponde a los valores de voltaje y corriente, donde la corriente del diodo de bypass es aproximadamente el 80% de su valor máximo. Por su parte (21) corresponde al punto donde la corriente en el diodo de bypass es aproximadamente la mitad de su valor máximo. Estos pares se escogen así, ya que, es posible que las corrientes de cortocircuito de la curva A ($I_{sc,A}$) y la curva B ($I_{sc,B}$) no sean exactamente iguales, debido a pequeñas variaciones en la irradiancia

cuando se miden ambas curvas.

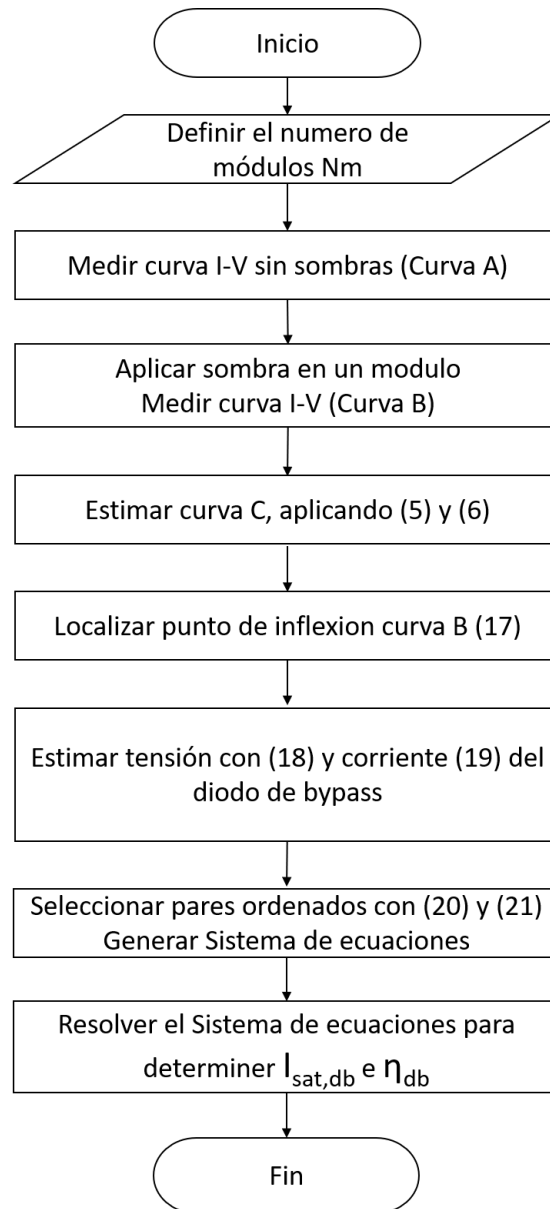
$$(x_1, y_1) = (V_{db_{Nm}}(ind(0.8 \cdot I_{db_{Nm}}(max))), I_{db_{Nm}}(0.8 \cdot I_{db_{Nm}}(max))) \quad (20)$$

$$(x_2, y_2) = (V_{db_{Nm}}(ind(0.5 \cdot I_{db_{Nm}}(max))), I_{db_{Nm}}(0.5 \cdot I_{db_{Nm}}(max))) \quad (21)$$

Tras obtener los pares ordenados, estos se reemplazan en el sistema de dos ecuaciones no lineales y dos incógnitas mostrado en (9), donde $I_{(sat,db)}$ y η_{db} son los parámetros a encontrar. Este sistema de ecuaciones se puede solucionar por medio de métodos como el de aproximaciones sucesivas o el de Newton-Raphson.

Lo comentado en esta sección, muestra el procedimiento para estimar los parámetros $I_{(sat,db)}$ y η_{db} de un diodo de bypass que se activa, cuando se aplica una sombra parcial a un módulo en un panel y este produce una corriente diferente de cero $I_m \neq 0A$ y menor a la corriente que producen los otros módulos del panel. El diagrama de flujo que resume el procedimiento anterior se puede ver en la figura 14.

Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.



3.2.1. Efectos de los errores en la medición de corriente y tensión. Como se mostró en la subsección 3.1.1, existe un error producto de los instrumentos con los cuales se miden las curvas A y B. El cual, a medida que se realizan operaciones en el procedimiento se propaga hacia los nuevos resultados. Los errores presentes en la medición de

los vectores de tensión y corriente de las curvas A y B, están dados por las ecuaciones (12) y (13). El error en la estimación del vector de tensión de la curva C, esta dado por la ecuación (14). Localizar el punto de inflexión en la curva B no propaga el error, ya que no se realiza una operación sobre la curva. Simplemente se busca el indice donde esta localizado el punto de inflexión. El error que se propaga al estimar el vector de tensiones del diodo de bypass, esta dado por la ecuación (15).

En la estimación del vector de corrientes del diodo de bypass, radica la diferencia que existe con respecto al error que se propagó y calculó en la subsección 3.1.1. En esta, para calcular el vector $I_{db_{Nm}}$ se debe restar el valor de la corriente de corto circuito del módulo sombreado a el vector de corriente I_B . Este nuevo vector, tiene un error proveniente del vector de corrientes de la curva B. Entonces, el error del vector de corrientes del diodo de bypass, se define por medio de la ecuación (22). Donde $\epsilon I_{sc_{Nm}}$ representa el error en la medición de $I_{sc_{Nm}}$.

$$\epsilon I_{db_{Nm}} = \sqrt{(\epsilon I_B)^2 + (\epsilon I_{sc_{Nm}})^2} \quad (22)$$

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO

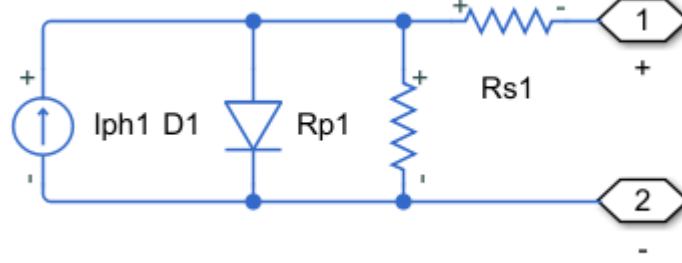
Para validar los métodos propuestos en el capítulo 3 se desarrolló un modelo de un panel FV en Simulink (incluido en la versión de Matlab 2017b), y un código en Matlab para cada uno de los casos expuestos en el capítulo anterior. Se utilizó el modelo de un solo diodo para desarrollar la simulación en Simulink, la cual recrea un panel de tres módulos. las características eléctricas del panel en la simulación, se tomaron de la hoja de especificaciones del panel solar Trina solar TSM-PD05 de 280W ²⁶, el cual esta compuesto por tres módulos y es el panel con el cual se realizará la validación experimental. Las características eléctricas de los diodos de bypass fueron obtenidas de la hoja de especificaciones del diodo GF3045T de Huajing Microelectronics ²⁷, ya que se pudo determinar en el panel con el que se va a realizar la validación experimental que los diodos de bypass son los que se mencionaron anteriormente. Además, se definió una temperatura de 45°C, para las celdas FV y los diodos de bypass, por ser la temperatura normal de operación (NOCT) del panel solar Trina solar TSM-PD05.

La representación circuital del panel realizado en Simulink se puede apreciar en la Figura 15. El circuito consta de tres módulos conectados en serie con sus respectivos diodos de bypass, una fuente dependiente de corriente controlada por una función rampa para realizar el barrido de corriente, y las resistencias que simulan el cable que conecta al panel con los instrumentos de medición. Adicionalmente, se incluyen sensores de corriente y tensión en los terminales de salida del panel y del diodo de bypass del módulo 3, para realizar las mediciones necesarias en el panel y en el diodo de bypass a parametrizar,

²⁶ Ltd Trina Solar Energy Co. “Trina Solar Honey Modul, TSM-PD05”. En: (2016), págs. 1-2.

²⁷ Wuxi China Resources Huajing Microelectronics CO. Silicon N-type Schottky rectifier diode. China.

Figura 16. Modelo circuital de un módulo PV en Simulink



Para el cálculo de los parámetros I_{sat} , η , R_s y R_p que se utilizaran en los módulos de la simulación, se utilizó el método propuesto en ⁴ dando como resultado los siguientes valores: $\eta = 0.8456$, $I_{sat} = 3.2310 \times 10^{-18} A$, $R_s = 0.2009 \Omega$, $R_h = 77.8361 \Omega$. Los valores de corriente para cada módulo I_{ph} se definen según el procedimiento que se está reproduciendo y la curva que se desee medir, tal como se muestra en las Tablas 1 y 8. En dichas tablas la columna Curva A muestra los valores de corriente de cada módulo al momento de medir la curva A, mientras que la columna Curva B muestra los valores de corriente de cada módulo cuando se mide la curva B.

Para el diodo de bypass se utilizaron las especificaciones de la hoja de datos del diodo GF3045T de Huajing Microelectronics ²⁷. De las especificaciones eléctricas dadas por el fabricante, se tomaron los pares ordenados $(I_{f1} = 20A, V_{f1} = 0.45V)$ y $(I_{f2} = 30A, V_{f2} = 0.5V)$, con los cuales se formó el sistema de ecuaciones no lineales mostrado en 10. Se utilizó la función fsolve de Matlab para resolver el sistema de ecuaciones obteniendo los siguientes valores: $I_{(sat,db)}^{ref} = 100\mu A$ y $\eta_{db}^{ref} = 1.435$, estos valores se utilizan para definir los parámetros de los diodos de bypass de los módulos en Simulink así: $I_{(sat,db1)} = I_{(sat,db)}^{ref} \cdot 0.8 = 80\mu A$, $I_{(sat,db2)} = I_{(sat,db)}^{ref} = 100\mu A$, $I_{(sat,db3)} = I_{(sat,db)}^{ref} \cdot 1.2 = 120\mu A$ y $\eta_{db1} = \eta_{db}^{ref} \cdot 0.8 = 1.148$, $\eta_{db2} = \eta_{db}^{ref} = 1.435$, $\eta_{db3} = \eta_{db}^{ref} \cdot 1.2 = 1.722$. Se propuso esta variación en los valores de los parámetros, para observar si el método propuesto estima los parámetros para diferentes valores de

referencia.

Se optó por utilizar diferentes valores para los parámetros de I_{sat} y η para cada uno de los diodos de bypass en Simulink. Esto con el fin de verificar que, el método propuesto es capaz de determinar los parámetros de los diodos para diferentes valores de referencia. Para probar los métodos propuestos en el capítulo 3, se definieron tres escenarios bajo diferentes niveles de irradiancia donde se validará la funcionalidad de estos.

4.1. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO $I_m = 0$

Para iniciar el procedimiento y siguiendo el diagrama de flujo de la imagen 10, se define el número de módulos que posee el panel, que para el caso de la simulación es $N_m = 3$. Además, se define $\Delta I = 5mA$, que será la diferencia de corriente que habrá entre cada uno de los puntos del barrido en corriente que se debe hacer para medir las curvas I-V del panel. También se deben definir los valores de I_{ph} que tendrá cada módulo para cada uno de los escenarios de este procedimiento, estos valores se pueden apreciar en la Tabla 1.

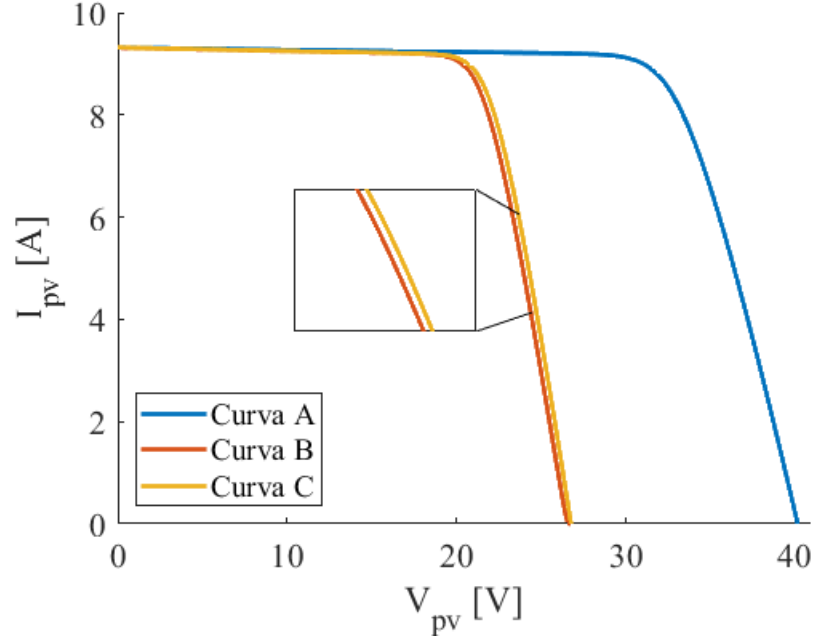
Tabla 1. I_{ph} y G utilizados en los escenarios de validación

Escenario	G [W/m^2]	Corrientes Curva A [A]			Corrientes Curva B [A]		
		I_{ph1}	I_{ph2}	I_{ph3}	I_{ph1}	I_{ph2}	I_{ph3}
1	1000	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	0
2	500	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	0
3	170	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	0

4.1.1. Escenario 1: (Irradiancia alta): En el primer escenario se consideran que los módulos se encuentran bajo condiciones de irradiancia alta ($G = 1000 \frac{W}{m^2}$). Se realiza el procedimiento propuesto para estimar los parámetros del diodo de bypass del módulo 3, utilizando el modelo desarrollado en simulink y el código implementado en Matlab que se comentó al inicio del capítulo.

Con N_m y ΔI definidos, se realiza el barrido de corriente para obtener la curva I-V en condiciones uniformes o Curva A, tal como se muestra en la Figura 17. Luego de medir la curva A, se debe sombrear completamente el módulo 3 del panel para que la corriente de ese módulo sea prácticamente cero, $I_{ph3} \approx 0A$. En ese momento se inicia un nuevo barrido de corriente para obtener la Curva B (ver Figura 17). Después de obtener la curva B, con los datos de la curva A y el número de módulos del panel N_m se estima la curva C, esto aplicando las ecuaciones (5) y (6). La curva C (Línea amarilla) se puede apreciar en Figura 17.

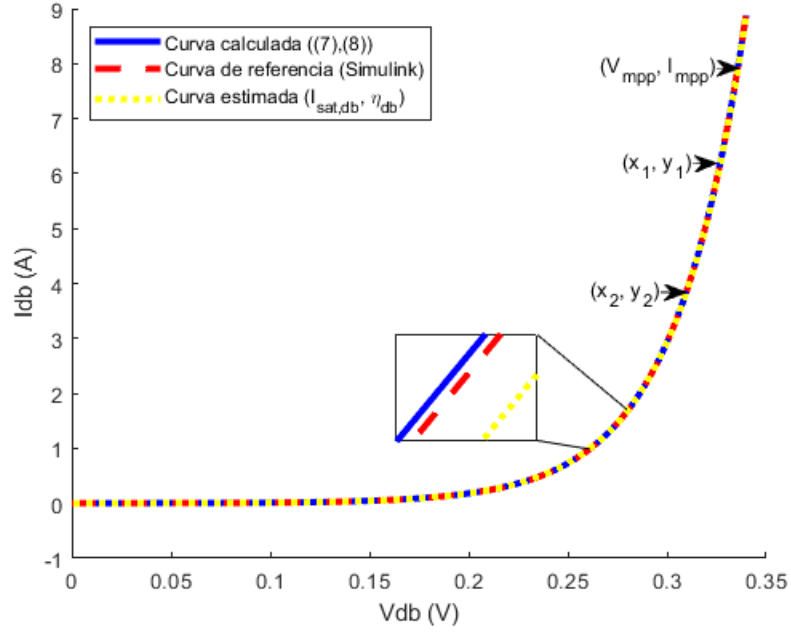
Figura 17. Curva A, B y C obtenidas para el Escenario 1.



Siguiendo con el diagrama de flujo de la Figura 10. Se procede a determinar la corriente y la tensión en el diodo de bypass $I_{db_{N_m}}$ y $V_{db_{N_m}}$, por medio de las operaciones indicadas en las ecuaciones (7) y (8). Los valores obtenidos se pueden ver reflejados en la Figura 18 (Línea Azul), donde también se aprecia la gráfica que se obtienen de los sensores ubicados en el diodo de bypass del módulo 3 (Línea roja).

Con los valores de corriente y tensión en el diodo de bypass y utilizando las ecuaciones (10) y (11), se seleccionan los pares ordenados en la curva calculada del diodo de bypass (Línea azul Figura 18), así: $(x_1 = 0.3271V, y_1 = 6.221A)$ y $(x_2 = 0.3546V, y_2 = 2.3350A)$. Con dichos puntos, se construye el sistema de ecuaciones definido en (9) y se hace la solución del mismo. En este procedimiento se utiliza la función `fsolve` de Matlab para solucionar el sistema de ecuaciones, obteniendo $I_{sat,db3}^{est} = 122.43\mu A$ y $\eta_{db3}^{est} = 1.7225$.

Figura 18. Curvas I-V del diodo de bypass obtenidas en el procedimiento



Los valores obtenidos de $I_{sat,db3}^{est} = 122.43\mu A$ y $\eta_{db3}^{est} = 1.7225$ por si solos no dan mucha información sobre la efectividad del método. Calculando el error relativo de los valores obtenidos con respecto a los valores de referencia $I_{(sat,db)}^{ref} = 120\mu A$ y $\eta_{db}^{ref} = 1.722$, se puede obtener el porcentaje de error que existe entre los valores estimados y los valores de referencia. Utilizando la ecuación del error relativo descrita en (23), los errores relativos para los parámetros obtenidos son 1,16 % para $I_{sat,db3}^{est}$ y 0,09 % para η_{db3}^{est} .

$$\%Error = \frac{Valor_{aprox}}{Valor_{exacto}} \cdot 100 \% \quad (23)$$

Para completar la validación del método para irradiancia alta, se procede a repetir el método y a calcular los errores relativos de los parámetros obtenidos en los módulos 1 y 2 del panel. Estos datos junto con los datos obtenidos para el módulo 3 se encuentra agrupados en la Tabla 2. En dicha tabla se puede deducir que a mayores valores de

referencia de $I_{sat,db}$ y η_{db} se obtienen mayores errores en la estimación de los parámetros con el procedimiento propuesto. Adicionalmente, los errores en la estimación de $I_{sat,db}^{est}$ y η_{db}^{est} son menores al 1,16 % y al 0,09 % respectivamente. Estos resultados muestran que el método propuesto estima los parámetros con un error bajo cuando se usa en irradiancias altas.

Tabla 2. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 1)

Modulo	Valores referencia	Valores estimados	Error [%]
1	$I_{sat,db1} = 80\mu A$	$I_{sat,db1}^{est} = 80.81\mu A$	1.01
	$\eta_{db1} = 1.148$	$\eta_{db1}^{est} = 1.149$	0.08
2	$I_{sat,db2} = 100.00\mu A$	$I_{sat,db2}^{est} = 101.07\mu A$	1.06
	$\eta_{db2} = 1.435$	$\eta_{db2}^{est} = 1.436$	0.09
3	$I_{sat,db3} = 120.00\mu A$	$I_{sat,db3}^{est} = 121.39\mu A$	1.16
	$\eta_{db3} = 1.722$	$\eta_{db3}^{est} = 1.723$	0.09

No solo se puede tener en cuenta el error relativo como una medida de la efectividad del método. Otro aspecto importante que puede corroborar la efectividad del método es calcular el error que existe en la reproducción de las curvas I-V obtenida con los valores hallados en el procedimiento (modelo exponencial) y la resultante de efectuar las ecuaciones (7) y (8) sobre las curvas B y C, y comparándolas con la curva I-V de los valores de referencia (Simulink). Dichos errores se calcularon usando el error cuadrático medio (RMSE) de la ecuación (24) donde los valores de referencia se obtuvieron con los sensores de tensión y corriente en cada diodo de bypass en Simulink (ver Figura 18).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (24)$$

La Tabla 3 muestra los errores obtenidos en la reproducción de la curva I-V para los tres diodos de bypass. La segunda columna de esta tabla muestra el error de la curva I-V del diodo de bypass obtenida por las ecuaciones (7) y (8) donde se obtienen errores menores al $9.84nV$, mientras que la tercera columna muestra el error de la curva I-V obtenida con los parámetros estimados, en la cual se consiguen errores menores al $0.60mV$. Estos errores al ser en el orden de los mV, muestran que el método propuesto para irradiancias altas, puede parametrizar el modelo exponencial de los diodos de bypass y reproducir su comportamiento eléctrico con una variación pequeña en los valores obtenidos para la curva I-V de los diodos de bypass.

Tabla 3. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 1)

Modulo	RMSE [V]	
	Simulink vs. (7) y (8)	Simulink vs. Modelo exponencial
1	$5.37\mu V$	$0.28mV$
2	$9.84nV$	$0.43mV$
3	$5.37\mu V$	$0.60mV$

4.1.2. Escenario 2: (Irradiancia media): En este escenario se aplica el procedimiento, considerando que los módulos del panel se encuentran bajo una condición de irradiancia media ($G = 500 \frac{W}{m^2}$). Se utilizan los mismos valores de los parámetros de los módulos y de los diodos de bypass que se usaron en el escenario 1 para configurar los circuitos de las figuras 15 y 16; únicamente se modifican los valores de las corrientes I_{ph} en los módulos (Ver Tabla 1) debido a las condiciones de irradiancia. Tras realizar el procedimiento para los tres diodos de bypass se obtienen los resultados de la Tabla 4.

Tabla 4. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 2)

Module	Valores referencia	Valores estimados	Error [%]
1	$I_{sat,db1} = 80.00\mu A$	$I_{sat,db1}^{est} = 81.46\mu A$	1.82
	$\eta_{db1} = 1.148$	$\eta_{db1}^{est} = 1.149$	0.16
2	$I_{sat,db2} = 100.00\mu A$	$I_{sat,db2}^{est} = 101.89\mu A$	1.88
	$\eta_{db2} = 1.435$	$\eta_{db2}^{est} = 1.437$	0.16
3	$I_{sat,db3} = 120.00\mu A$	$I_{sat,db3}^{est} = 122.43\mu A$	2.02
	$\eta_{db3} = 1.722$	$\eta_{db3}^{est} = 1.725$	0.17

En este escenario los errores obtenidos tienen una variación con respecto a los errores en el escenario 1. Se puede apreciar que para mayores valores de I_{sat}^{db} y η_{db} se obtienen mayores valores en los porcentajes de error. Los errores en este escenario oscilan 1.82 % y 2.02 % para $I_{(sat,db)}$ y entre el 0.16 % y 0.17 % para η_{db} . Este aumento en los errores puede ser debido a que en el escenario 2 el valor máximo de corriente en los diodos de bypass es menor al valor máximo de corriente en los diodos de bypass en el escenario 1. Por lo tanto, en el escenario 2 las curvas I-V de los diodos de bypass solo cubren una parte de las curvas I-V que se presentan en el escenario 1.

De la misma manera que en el escenario 1, se calcula el error en la reproducción de la curva calculada con (7) y (8) y la curva utilizando el modelo exponencial con respecto a la curva del diodo de bypass obtenida en la simulación; estos errores se pueden apreciar en la Tabla 5. Se observa que las curvas I-V calculadas con (7) y (8) reproducen las curvas I-V de los diodos de bypass con errores menores al $6.84\mu V$; mientras que la reproducción de las curvas con los parámetros estimados es menor al 1.05 mV.

Tabla 5. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 2)

Modulo	RMSE [V]	
	Simulink vs. (7) and (8)	Simulink vs. Modelo exponencial
1	$6.84\mu V$	$0.5mV$
2	$0.21nV$	$0.75mV$
3	$6.84\mu V$	$1.05mV$

4.1.3. Escenario 3: (Irradiancia baja): Para este escenario los módulos en la simulación se encuentran bajo una condición de irradiancia baja ($G = 170 \frac{W}{m^2}$), al aplicar el procedimiento se obtienen los resultados de la Tabla 6

Tabla 6. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 3)

Module	Valores referencia	Valores estimados	Error [%]
1	$I_{sat,db1} = 80.00\mu A$	$I_{sat,db1}^{est} = 82.07\mu A$	2.59
	$\eta_{db1} = 1.148$	$\eta_{db1}^{est} = 1.151$	0.24
2	$I_{sat,db2} = 100.00\mu A$	$I_{sat,db2}^{est} = 102.63\mu A$	2.63
	$\eta_{db2} = 1.435$	$\eta_{db2}^{est} = 1.438$	0.24
3	$I_{sat,db3} = 120.00\mu A$	$I_{sat,db3}^{est} = 123.36\mu A$	2.80
	$\eta_{db3} = 1.722$	$\eta_{db3}^{est} = 1.726$	0.25

Para este escenario y como ha sido constante en los dos anteriores se puede apreciar que a medida que se aumentan los valores en I_{sat}^{db} y η_{db} se obtienen mayores valores en los porcentajes de error.

Los errores en la existentes entre las curvas calculada con (7) y (8) y la del modelo exponencial del diodo con respecto a la obtenida en simulación de Simulink se pueden apreciar en la Tabla 7

Tabla 7. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 3)

Modulo	RMSE [V]	
	Simulink vs. (7) and (8)	Simulink vs. Modelo exponencial
1	$8.40\mu V$	$0.7m$
2	$5.90nV$	$1.04m$
3	$8.40\mu V$	$1.43m$

Además, se puede decir que el procedimiento propuesto exhibe errores diferentes a cero en la estimación de los parámetros del diodo de bypass, incluso en un escenario de simulación sin tolerancias de elementos y medición de ruido y errores. Por lo tanto, se espera que los errores en la validación experimental sean mayores debido a los errores de medición, el ruido y las pequeñas variaciones en las condiciones de operación durante la medición de las curvas A y B.

4.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CUANDO $I_{sc} > I_m > 0A$

En esta sección se mostrará la validación por simulación del método propuesto en la sección 2.2. De la misma manera que en la sección anterior, esta se encuentra dividida en tres subsecciones que muestran cada uno de los escenarios que se plantearon para hacer la validación del método propuesto.

Igualmente se debe definir el número de módulos N_m y el ΔI con el que se hará el barrido de corriente. Además, se deben declarar los valores de corriente que tendrán los módulos para la medición de la curva A y la curva B, estos valores están definidos en la Tabla 8. Para la validación del método, se asumió que la sombra reduce en un 50 % la irradiancia que llega sobre el módulo; es por eso que el valor en la columna I_{ph3} de

la curva B en la Tabla 8 es la mitad de I_{ph3} para la curva A.

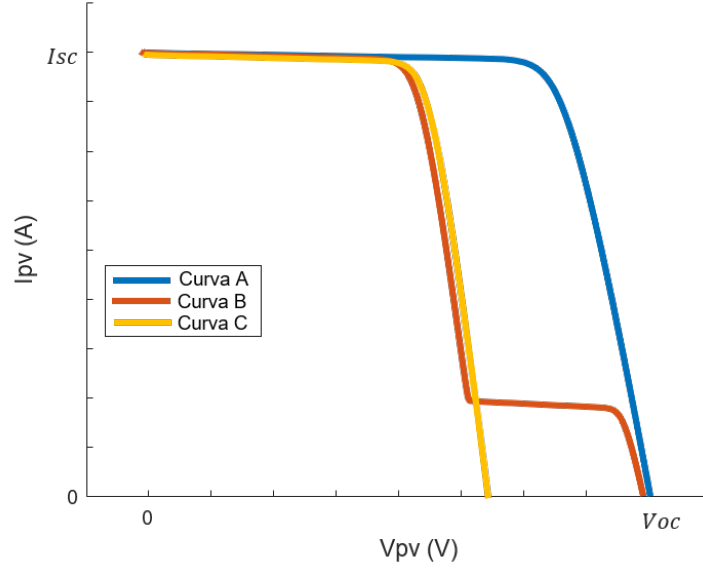
Tabla 8. I_{ph} e G utilizados en los escenarios de validación

Escenario	G [W/m^2]	Corrientes Curva A [A]			Corrientes Curva B [A]		
		I_{ph1}	I_{ph2}	I_{ph3}	I_{ph1}	I_{ph2}	I_{ph3}
1	1000	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	4.67
2	500	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	2.34
3	170	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	0.8

4.2.1. Escenario 1: (Irradiancia alta): Para este escenario los módulos en la simulación se encuentra bajo una condición de irradiancia alta ($G = 1000 \frac{W}{m^2}$). Para iniciar con el procedimiento se debe tener el número de módulos del panel N_m y el ΔI . Con esto, se realiza el barrido de corriente para obtener la curva I-V en condiciones uniformes o Curva A. Al terminar de medir la curva A, se debe sombrear parcialmente un módulo del panel para que la corriente de ese módulo sea aproximadamente el 50 %, $I_{ph3} \approx 4.67A$. En ese momento se inicia un nuevo barrido de corriente para obtener la Curva B. Al terminar de medir la curva B, y siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 14 se debe localizar el punto de inflexión en la curva B. Para esto se debe calcular la curva P-V con los valores de tensión y corriente de la curva B, y aplicar la ecuación (17), para así hallar el punto de inflexión.

Luego de obtener el punto de inflexión en la curva B, se procede a estimar la curva C utilizando las ecuaciones (5) y (6). Las curvas A, B y C y el punto de inflexión de la curva B se pueden apreciar en la Figura 19.

Figura 19. Curva A, B y C obtenidas para el Escenario 1.



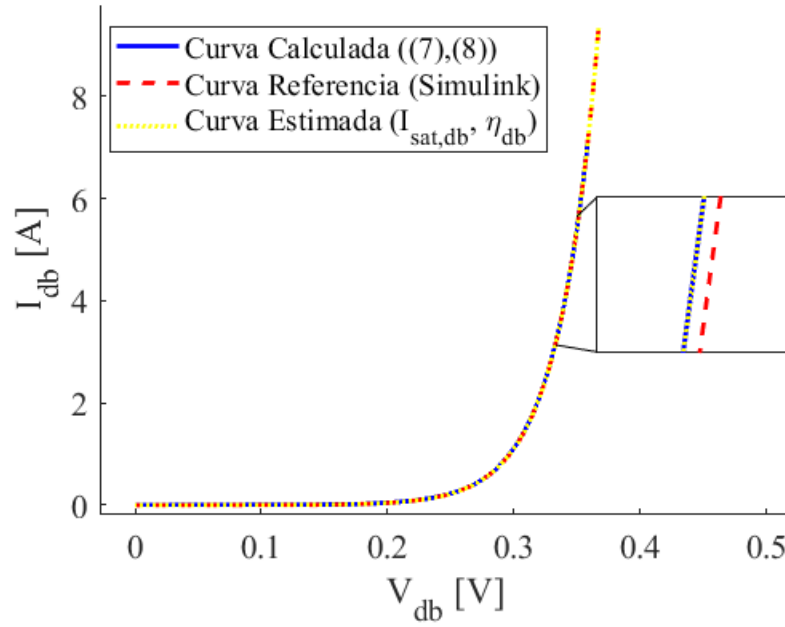
Siguiendo con el diagrama de flujo de la Figura 14. Se procede a limitar las curvas B y C a los valores comprendidos entre la corriente de cortocircuito del panel y la corriente donde se localiza el punto de inflexión ($i = 1 \dots i_{pi}$), esto para los vectores de corriente. Para los vectores de tensión se deben limitar a los valores comprendidos entre 0V y el voltaje donde se localiza el punto de inflexión. Esto se realiza para obtener las secciones de las curvas B y C en donde se garantiza que el diodo de bypass esta activado.

Tras realizar estas operaciones, se calcula el vector de tensiones del diodo de bypass ($V_{db_{N_m}}$). El cual se obtiene restando punto a punto las tensiones de las curvas B y C desde 0V hasta la tensión del punto de inflexión. Por otro lado el vector de corrientes del diodo de bypass ($I_{db_{N_m}}$), se obtiene de limitar la curva B a los valores comprendidos entre la corriente de cortocircuito y el valor de corriente donde se localizó el punto de inflexión. A estos valores se les debe restar el valor de la corriente de cortocircuito del módulo sombreado como lo indica la ecuación (19). Cabe recordar que los vectores de corriente de todas las curvas obtenidas en todos los procedimientos son las mismas ya

que se establecieron con un valor fijo a partir del barrido de corriente con el cual se obtuvieron las curvas A y B.

Los valores obtenidos se pueden ver reflejados en la Figura 20 (Línea Azul), donde también se aprecia la gráfica que se obtienen de los sensores ubicados en el diodo de bypass del módulo 3 (Línea roja).

Figura 20. Curvas I-V del diodo de bypass obtenidas en el procedimiento



Con los valores de corriente y tensión en el diodo de bypass y utilizando las ecuaciones (20) y (21), se seleccionan los pares ordenados en la curva calculada del diodo de bypass (Línea azul Figura 18), así: $(x_1 = 0.3271V, y_1 = 6.221A)$ y $(x_2 = 0.3546V, y_2 = 2.3350A)$. Con dichos puntos, se construye el sistema de ecuaciones definido en (9) y se hace la solución del mismo, en este procedimiento también se utilizó la función `fsolve` de Matlab para solucionar el sistema de ecuaciones, obteniendo $I_{sat,db3}^{est} = 78.24\mu A$ y $\eta_{db3}^{est} = 1.15$. Se calcula el error relativo de los valores obtenidos con respecto a los

valores de referencia, obteniendo los siguientes resultados: 2.21 % para $I_{sat,db3}^{est}$ y 0.19 % para η_{db3}^{est} .

Para completar la validación del método. Se procede a repetir el método para los módulos 1 y 2 del panel. Los datos obtenidos para cada uno de los módulos se encuentran agrupados en la Tabla 9. En dicha tabla no se puede apreciar una tendencia creciente o decreciente de los errores relativos como se presentó en la sección 4.1. Se observa que el menor error se obtiene para irradiancias medias y los mayores para irradiancias altas. Se puede decir que para irradiancias medias el método ofrece unos errores relativos aceptables del orden del 2.66 % para $I_{sat,db}$ y del 0.24 % para η_{db} .

Tabla 9. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 1)

Modulo	Valores referencia	Valores estimados	Error [%]
1	$I_{sat,db1} = 80\mu A$	$I_{sat,db1}^{est} = 78.23\mu A$	2.21
	$\eta_{db1} = 1.148$	$\eta_{db1}^{est} = 1.146$	0.18
2	$I_{sat,db2} = 100.00\mu A$	$I_{sat,db2}^{est} = 97.34\mu A$	2.66
	$\eta_{db2} = 1.435$	$\eta_{db2}^{est} = 1.431$	0.24
3	$I_{sat,db3} = 120.00\mu A$	$I_{sat,db3}^{est} = 116.6\mu A$	2.84
	$\eta_{db3} = 1.722$	$\eta_{db3}^{est} = 1.718$	0.27

No solo se puede tener en cuenta el error relativo como una medida de la efectividad del método. Calculando el error que producen los parámetros estimados en la reproducción de la curva I-V del diodo de bypass se puede determinar si los valores obtenidos en los parámetros se pueden utilizar o no para reproducir el comportamiento eléctrico del diodo de bypass. Dichos errores se calcularon usando el error cuadrático medio RMSE, (ecuación (24)), donde los valores de referencia se obtuvieron con los sensores de tensión y corriente en cada diodo de bypass en Simulink (ver Figura 18).

La Tabla 10 muestra los errores obtenidos en la reproducción de la curva I-V para los tres diodos de bypass. La segunda columna de esta tabla, muestra el error de la curva I-V del diodo de bypass obtenida por las ecuaciones (7) y (8). La tercera columna muestra el error de la curva I-V obtenida con los parámetros estimados. En esta ultima se consiguen errores menores al $6mV$, que en comparación con los errores de la segunda columna, ($9\mu V$) son grandes, pero estos valores son pequeños si se comparan con los valores que posee el vector estimado de tensiones del diodo de bypass.

Tabla 10. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 1)

Modulo	RMSE [V]	
	Simulink vs. (7) y (8)	Simulink vs. Modelo exponencial
1	$8.57\mu V$	$4.19mV$
2	$0.13nV$	$4.7mV$
3	$8.57\mu V$	$5.1mV$

4.2.2. Escenario 2: (Irradiancia media): Para este escenario los módulos en la simulación se encuentra bajo una condición de irradiancia baja ($G = 500 \frac{W}{m^2}$), al aplicar el procedimiento se obtienen los resultados de la Tabla 11.

Tabla 11. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 2)

Modulo	Valores referencia	Valores estimados	Error [%]
1	$I_{sat,db1} = 80\mu A$	$I_{sat,db1}^{est} = 80.20\mu A$	0.25
	$\eta_{db1} = 1.148$	$\eta_{db1}^{est} = 1.149$	0.049
2	$I_{sat,db2} = 100\mu A$	$I_{sat,db2}^{est} = 98.87\mu A$	1.13
	$\eta_{db2} = 1.435$	$\eta_{db2}^{est} = 1.433$	0.11
3	$I_{sat,db3} = 120\mu A$	$I_{sat,db3}^{est} = 117.80mA$	1.83
	$\eta_{db3} = 1.722$	$\eta_{db3}^{est} = 1.719$	0.20

Los errores existentes en la reproducción de la curva entre las curvas calculadas con (7) y (8) y la del modelo exponencial del diodo con respecto a la obtenida en simulación de Simulink se pueden apreciar en la Tabla 12

Tabla 12. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 2)

Modulo	RMSE [V]	
	Simulink vs. (7) y (8)	Simulink vs. Modelo exponencial
1	14.55μ	$2.86m$
2	$1.05n$	$3.1m$
3	14.55μ	$3.30m$

4.2.3. Escenario 3: (Irradiancia baja): Para este escenario los módulos en la simulación se encuentra bajo una condición de irradiancia baja ($G = 170 \frac{W}{m^2}$), al aplicar el procedimiento se obtienen los resultados de la Tabla 13.

Tabla 13. Errores relativos de los parámetros estimados (Escenario 3)

Modulo	Valores referencia	Valores estimados	Error [%]
1	$I_{sat,db1} = 80\mu A$	$I_{sat,db1}^{est} = 82.06\mu A$	2.58
	$\eta_{db1} = 1.148$	$\eta_{db1}^{est} = 1.151$	0.29
2	$I_{sat,db2} = 100\mu A$	$I_{sat,db2}^{est} = 100.18\mu A$	0.18
	$\eta_{db2} = 1.435$	$\eta_{db2}^{est} = 1.435$	0.013
3	$I_{sat,db3} = 120\mu A$	$I_{sat,db3}^{est} = 118.68\mu A$	1.73
	$\eta_{db3} = 1.722$	$\eta_{db3}^{est} = 1.719$	0.15

Los errores existentes en la reproducción de la curva entre las curvas calculada con (7) y (8) y la del modelo exponencial del diodo con respecto a la obtenida en simulación de Simulink se pueden apreciar en la Tabla 14

Tabla 14. Errores en la reproducción de las curvas de los diodos de bypass (Escenario 3)

Modulo	RMSE [V]	
	Simulink vs. (7) y (8)	Simulink vs. Modelo exponencial
1	$21\mu V$	$2.18m$
2	$2.32nV$	$2.39m$
3	$21\mu V$	$2.7m$

Como se pudo observar en la sección, los errores obtenidos en los parámetros estimados son menores al 3 %. Los errores obtenidos en la reproducción de la curva I-V con el modelo exponencial son altos si se comparan con los obtenidos usando el modelo descrito por las ecuaciones (7) y (8). Pero, sí se comparan con los valores que posee el vector de tensiones del diodo de bypass, ($V_{db_{N-m}}$), estos son pequeños y no modifican considerablemente la reproducción de la curva I-V del diodo de bypass. Se puede destacar

que los errores en la reproducción de la curva I-V del diodo de bypass se conservan en el mismo orden de magnitud para los tres escenarios de irradiancia. Esto sugiere que el modelo exponencial puede ser ajustado para obtener porcentajes de error más bajos.

5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

En la sección 3, se mostraron dos métodos para estimar los parámetros del diodo de byass. En este capítulo se mostrará la validación experimental del método cuando existe sombra total en el módulo. La validación experimental del segundo método queda propuesta como un trabajo futuro del presente libro. Este capítulo está basado en el artículo publicado "A non-invasive procedure for estimating the exponential model parameters of bypass diodes in photovoltaic modules", publicado en la revista *Energies* ²⁸

5.1. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Para realizar la validación experimental, se implementó el montaje mostrado en la figura 21. Este montaje, el cual está compuesto por un panel trina solar TSM-PD05 270W ²⁶, una carga electrónica programable BK Precision 8500 ²⁹, un computador con el software Matlab y una lámina de madera para cubrir uno de los módulos del panel. El panel se encuentra instalado en la terraza del edificio de livianos de la Universidad Industrial de Santander y se conecta a la carga, por medio de un par de cables AWG-12. A su vez, la carga electrónica se conecta al computador por medio de comunicación USB, (la carga incluye un convertidor de RS232 a USB, la comunicación serial esta configurada a 9600 baudios por segundo), para poder intercambiar información y obtener la curva I-V del panel realizando un barrido de corrientes y leyendo los valores de tensión y corriente en el panel.

²⁸ Jeisson Vélez-Sánchez y col. "A Non-Invasive Procedure for Estimating the Exponential Model Parameters of Bypass Diodes in Photovoltaic Modules". En: *Energies* 12.2 (2019), pág. 303. DOI: 10.3390/en12020303.

²⁹ B&K Precision Corp. 8500 Series DC Electronic Loads. 2009.

Figura 21. Montaje experimental.



Fuente: 28

Además de la configuración en la comunicación serial de la carga, se debe considerar los tiempos necesarios para medir la curva A, introducir la sombra en el modulo y medir la curva B. En resumen, en la validación experimental, la secuencia para adquirir los datos toma aproximadamente 23 segundos desglosados así:

- Tomar la curva A, el código junto con la carga toma una curva I-V de 50 puntos en un tiempo de 10 segundos.
- Sombrear el módulo en el que se desea estimar los parámetros del diodo de bypass lleva alrededor de 3 segundos.
- Tomar la curva B toma alrededor de 10 segundos hacer un nuevo barrido en corriente para obtener los 50 puntos de la curva I-V.

Bajo condiciones de pocas nubes o cielo despejado se espera que la irradiancia no cambie considerablemente en un espacio de 23 segundos, por lo tanto, se considera que este es

un tiempo suficientemente rápido para tomar las curvas. Sin embargo, se puede tomar una precaución adicional: verificar que las diferencias de corriente de cortocircuito de las curvas A y B sean cercanas. En los experimentos realizados esta diferencia es menor al 3 % para los experimentos de alta y media irradiancia.

5.2. EFECTOS DE LOS ERRORES DE LA MEDICIÓN DE CORRIENTE Y TENSIÓN

En las subsecciones 3.1.1 y 3.2.1 del capítulo 3, se comentó sobre el error en la medición y como este error se propagaba en los procedimientos propuestos. En esta sección se mostrara cual es el error que se presenta en la medición de las curvas I-V que se realizan en el procedimiento y como este error influye en los resultados obtenidos.

La carga utilizada en el procedimiento dentro de sus especificaciones, posee una precisión para las mediciones de corriente de $\pm(0.2 \% + 0.15 \%FS)$ y de $\pm(0.02 \% + 0.025 \%FS)$ para las mediciones de tensión; por lo tanto, $C_{\epsilon I1} = 19mA$, $C_{\epsilon I2} = 45mA$, $C_{\epsilon V1} = 8mV$ y $C_{\epsilon V2} = 30mV$ en (12) y (13). La carga se configuró con un FS de corriente de 30 A y un FS de tensión de 120V. Los errores máximos y mínimos son:

$$\epsilon I_A = \epsilon I_B = \epsilon I_C = \begin{cases} \pm 45mA & I = 0A, \text{ mínimo} \\ \pm 64mA & I = 9.18A, \text{ máximo} \end{cases} \quad (25)$$

$$\epsilon V_A = \epsilon V_B = \begin{cases} \approx \pm 30mV & V = 0.1V, \text{ minimo} \\ \pm 38mV & V = 38.4V, \text{ maximo} \end{cases} \quad (26)$$

$$\epsilon V_C = \begin{cases} \approx \pm 20mV & V = 0.1V, \text{ minimo} \\ \pm 26mV & V = 25.6V, \text{ maximo} \end{cases} \quad (27)$$

$$\epsilon V_{db_{N_m}} = \begin{cases} \pm 36.1mA & V = 0.1V, \text{ mínimo} \\ \pm 46.1mA & V = 38.4V, \text{ máximo} \end{cases} \quad (28)$$

$$\epsilon I_{db_{N_m}} = \begin{cases} \pm 45mA & I = 0A, \text{ mínimo} \\ \pm 64mA & I = 9.18A, \text{ máximo} \end{cases} \quad (29)$$

Teniendo en cuenta, los valores máximos y mínimos de los errores mostrados en (25) y (26), se obtienen los valores mínimos y máximos de ϵV_C como se muestra en (27). Los errores en las tensiones y corrientes del diodo de bypass se calculan utilizando las ecuaciones (15) y (16) de las cuales, se obtienen los errores mostrados en (28) y (29).

Estos valores indican que para altas irradiancias, donde la corriente en el diodo de bypass puede llegar a varios amperios; las variaciones entre los valores estimados y los valores reales son pequeñas. Pero, en bajas irradiancias donde la corriente del diodo de bypass puede llegar a 1 o 2A estas variaciones son significativas y pueden influir en los valores estimados por el procedimiento. A partir de los errores de corriente mostrados en (25) se concluye, que se debe garantizar que los saltos en corriente (ΔI) sean mayores a $\epsilon I_{db_{N_m}}$, para garantizar que los saltos de corriente no se encuentren en el intervalo de la incertidumbre. Adicionalmente, los errores en $V_{db_{N_m}}$ están en el orden de las decenas

de mV mientras que las tensiones del diodo de bypass están en el orden de los cientos de mV. Por lo tanto, la exactitud de la carga es suficiente para aplicar el procedimiento.

5.3. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se definieron dos intervalos de irradiancias: altas y medias, las cuales se pueden identificar por el valor de la corriente de cortocircuito en el panel así: irradiancias altas corresponden a los valores entre $6A < I_{sc} < 9A$, irradiancias medias corresponden a $3A < I_{sc} < 6A$. Para todos los valores de irradiancia se definió que los puntos a tomar para cada curva serian $N = 50$, esto con el fin de evitar que los saltos de corriente sean muy pequeños y se presenten inconvenientes al momento de tomar los datos. Por lo tanto el valor de ΔI se estableció como $\Delta I = I_{sc,A}/N$, donde $I_{sc,A}$ es el valor de la corriente de cortocircuito medida en la curva A de cada experimento. No se definió un intervalo de irradiancia baja, debido a que los saltos de corriente para bajas irradiancia, están dentro del intervalo de incertidumbre de los procedimientos.

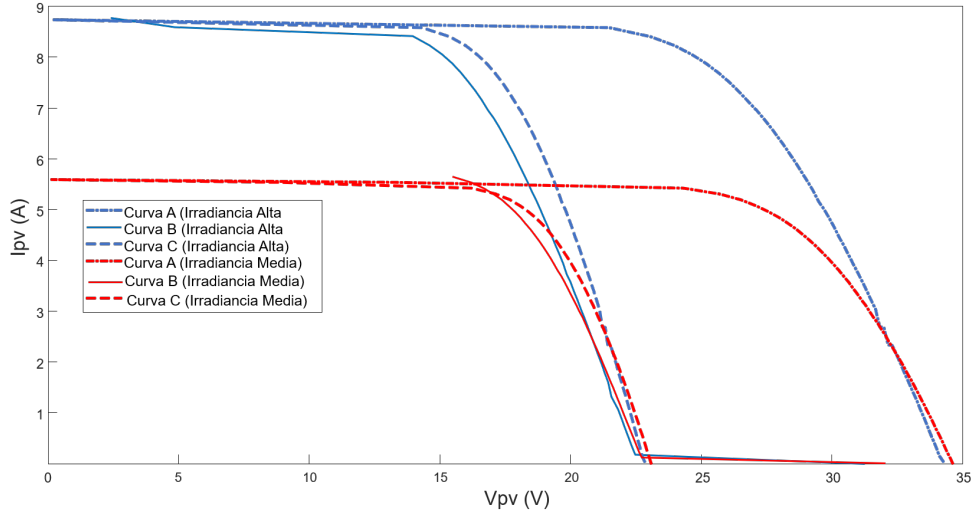
Al momento de obtener las curvas A y B se debe tener en cuenta la resistencia de los cables que conectan el panel a la carga. La resistencia del par de cables que conectan el panel a la carga es diferente de cero ($R_{cable} = 313.4m\Omega$). Entonces los voltajes de las curvas A y B deben ser recalculados a partir de los voltajes que se obtienen en la carga. Esto se realiza utilizando las ecuaciones (30) y (31), donde $V_{A,load}$ y $V_{B,load}$ son los voltajes medidos por la carga electrónica. Por otro lado, las corrientes de las curvas A (I_A) y B (I_B), son las corrientes medidas por la carga, ya que la corriente que fluye por el módulo y la carga son la misma.

$$V_A = \{V_{A,load}(i) + I_A \cdot R_{cable}, i=1...N\} \quad (30)$$

$$V_B = \{V_{B,load}(i) + I_B \cdot R_{cable}, i=1...N\} \quad (31)$$

La curva C, se estima usando las ecuaciones (5) y (6). La figura 22 muestra las curvas experimentales A y B obtenidas para el Módulo 1 para irradiancias altas medias y bajas, así como las curvas C estimadas según el procedimiento propuesto.

Figura 22. Curvas experimentales del Módulo 1 para irradiancia alta y media



A partir de las curvas B y C expuestas en la figura 22 se obtienen las curvas I-V del diodo de bypass del Módulo 1 para irradiancias altas y medias que se muestran en las figuras 23 y 24, respectivamente. Aplicando el procedimiento propuesto se obtienen los parámetros del diodo de bypass del Módulo 1 $I_{sat,db}$ y η_{db} que se muestran en la Tabla 15. Utilizando dichos parámetros en el modelo exponencial del diodo se obtienen las curvas I-V que se muestran en las figuras 23 y 24 con líneas continuas.

Se realizaron veinte experimentos en total para el módulo 1, diez para cada nivel de irradiancia, con el fin de ilustrar el comportamiento de los parámetros estimados del diodo de bypass con el método propuesto. La Tabla 15 muestra los valores promedio y las desviaciones estándar de $I_{sat,db}$ y η_{db} para cada nivel de irradiancia, así como la RM-SE, (que se calculó tomando como curva de referencia la curva obtenida a partir de las ecuaciones (7) y (8)) en la reproducción de la curva I-V del diodo de bypass. Además, en la tabla 16 se introducen los valores medios, y desviaciones estándar de $V_{t,db}$, T_{bd} y I_{sc} .

Se puede observar que $I_{sat,db}$ se reduce significativamente cuando la irradiancia disminuye y la desviación estándar está en el mismo orden de los valores estimados (es decir, relativamente alto). Aunque, η_{db} también se reduce con las reducciones de irradiancia, su desviación estándar es baja con respecto a los valores promedio. Además, los errores en la reproducción de la curva I-V son del orden de mV con una desviación estándar relativamente alta, lo cual muestra que el procedimiento propuesto es capaz de reproducir el comportamiento eléctrico del diodo de bypass en diferentes niveles de irradiancia, pero la precisión en la reproducción de la curva I-V depende de las condiciones de irradiancia y temperatura.

Vale la pena señalar que la plataforma experimental se encuentra instalada en exteriores, es decir en un ambiente no controlado, por lo tanto, es difícil obtener dos conjuntos de curvas A y B para un módulo operando bajo las mismas condiciones. Tal variabilidad en las condiciones de irradiancia y temperatura es una de las razones de la variabilidad de los parámetros del diodo de bypass y los errores en la reproducción de las curvas I-V. La variabilidad en las condiciones de operación se muestra en la Tabla 16, que presenta las desviaciones estándar en la temperatura del diodo de bypass cercanas a los 3 K y en la corriente de cortocircuito (proporcional a la irradiancia) de cientos de mA.

Figura 23. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 1 para alta irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.

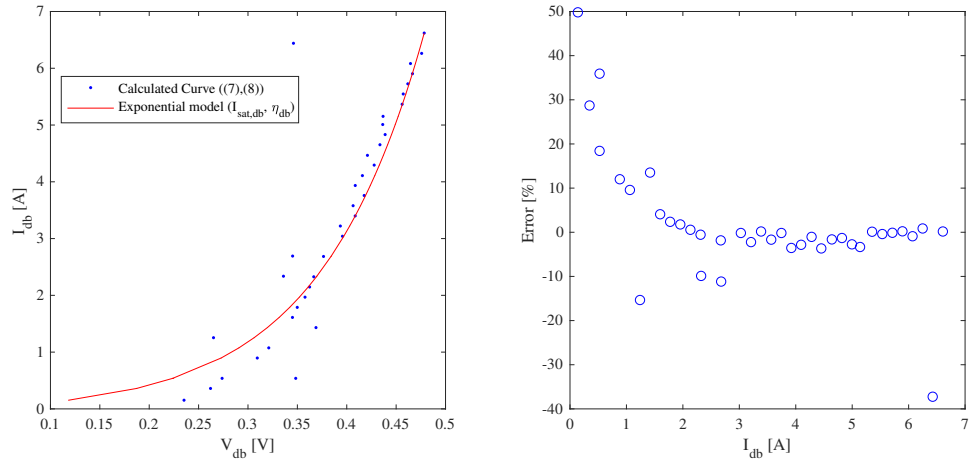


Figura 24. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 1 para media irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.

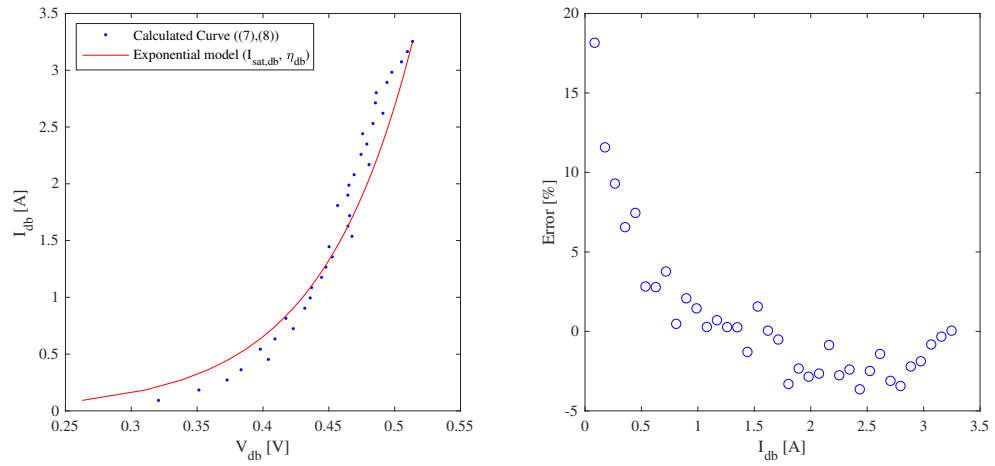


Tabla 15. Parámetros estimados para el diodo de bypass en el módulo 1 para alta y media y RMSE para la reproducción de la curva I-V.

Irradiance	$\overline{I_{sat,db}}$ [A]	$\sigma(I_{sat,db})$	$\overline{\eta_{db}}$	$\sigma(\eta_{db})$	RMSE [V]	σ (RMSE)
High	9.828×10^{-2}	1.173×10^{-1}	5.028	1.173×10^{-1}	5.057×10^{-2}	3.115×10^{-2}
Medium	6.522×10^{-5}	9.386×10^{-5}	1.426	9.386×10^{-5}	7.308×10^{-3}	1.349×10^{-3}

Tabla 16. Voltaje térmico, temperatura del diodo de bypass y corriente de cortocircuito en el módulo 1 para alta y media irradiancia de los datos experimentales.

Irradiance	$\overline{V_{t,db}}$ [V]	$\sigma(V_{t,db})$ [V]	$\overline{T_{db}}$ [K]	$\sigma(T_{db})$ [K]	$\overline{I_{sc}}$ [A]	$\sigma(I_{sc})$ [A]
High	2.804×10^{-2}	2.746×10^{-4}	325.414	3.187	8.402	2.958×10^{-1}
Medium	2.710×10^{-2}	2.543×10^{-4}	314.470	2.951	5.245	9.178×10^{-1}

Del mismo modo, el procedimiento propuesto se aplicó a los módulos 2 y 3 para calcular los parámetros de sus diodos de bypass. Las tablas 17 y 19 presentan los parámetros estimados con sus respectivos RMSE en la reproducción de la curva I-V de los diodos de bypass para cada condición de irradiancia; mientras que las Tablas 18 y 20 muestran la información del voltaje térmico, temperatura del módulo y corrientes de cortocircuito para los diferentes experimentos.

Figura 25. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 2 para alta irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.

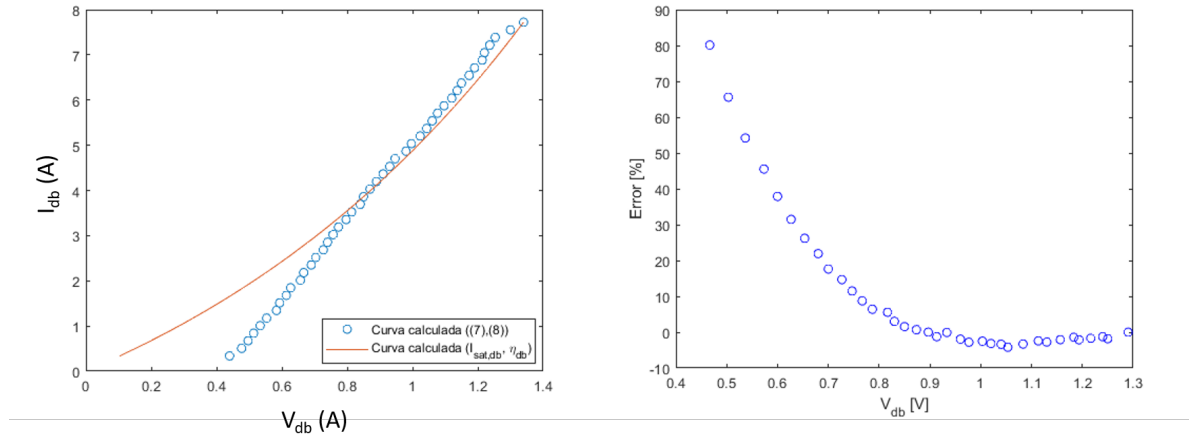


Figura 26. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) de el diodo de bypass en el módulo 2 para media irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.

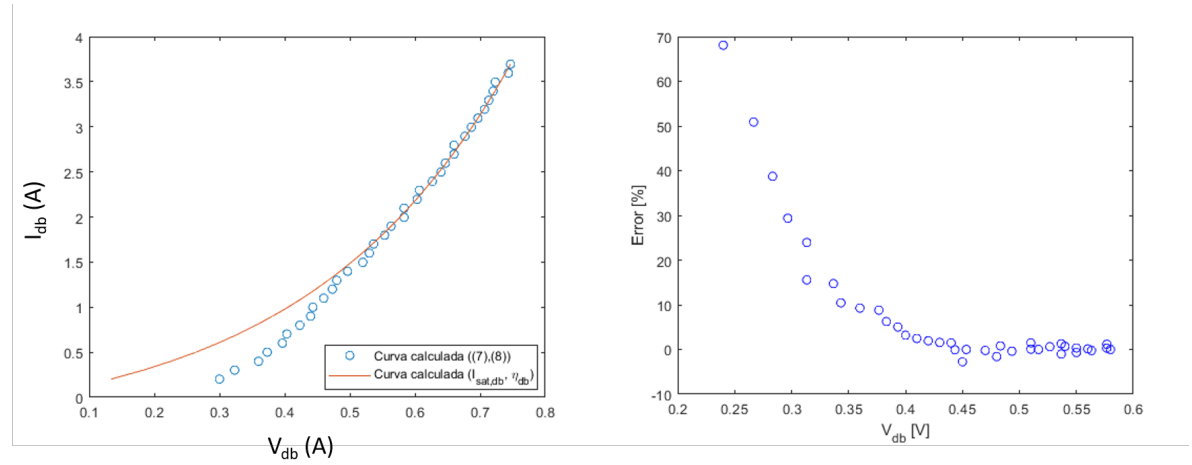


Tabla 17. Parámetros estimados para el diodo de bypass en el módulo 2 para alta y media irradiancia y RMSE para la reproducción de la curva I-V.

Irradiance	$\overline{I_{sat,db}}$ [A]	$\sigma(I_{sat,db})$	$\overline{\eta_{db}}$	$\sigma(\eta_{db})$	RMSE [V]	σ (RMSE)
High	3.474×10^{-3}	5.687×10^{-3}	2.359	5.687×10^{-3}	1.765×10^{-2}	9.913×10^{-3}
Medium	6.036×10^{-6}	3.519×10^{-6}	1.157	3.519×10^{-6}	6.632×10^{-3}	2.215×10^{-3}

Tabla 18. Voltaje térmico, temperatura del diodo de bypass y corriente de cortocircuito en el módulo 2 para alta y media irradiancia de los datos experimentales.

Irradiance	$\overline{V_{t,db}}$ [V]	$\sigma(V_{t,db})$ [V]	$\overline{T_{db}}$ [K]	$\sigma(T_{db})$ [K]	$\overline{I_{sc}}$ [A]	$\sigma(I_{sc})$ [A]
High	2.820×10^{-2}	1.920×10^{-4}	327.285	2.228	8.587	3.215×10^{-1}
Medium	2.702×10^{-2}	2.219×10^{-4}	313.513	2.575	4.946	7.977×10^{-1}

Figura 27. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 3 para alta irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.

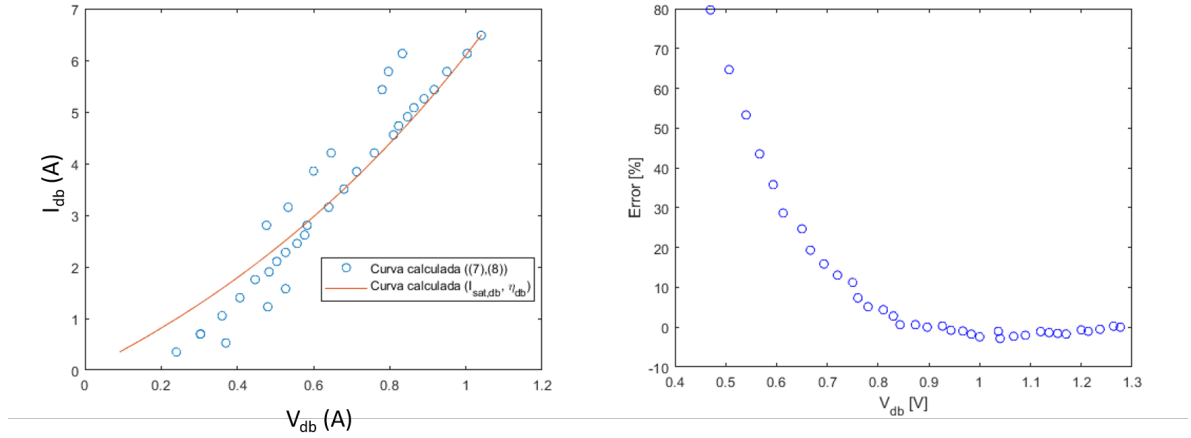


Figura 28. Izquierda: Curva I-V experimental (puntos) y reproducida (línea) del diodo de bypass en el módulo 3 para media irradiancia Derecha: Porcentajes de error del voltaje del diodo de bypass.

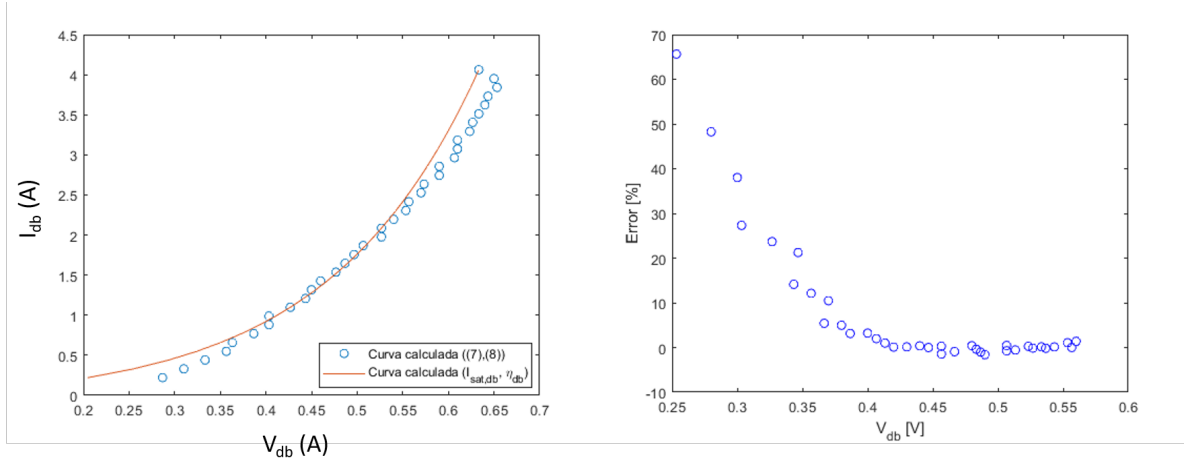


Tabla 19. Parámetros estimados para el diodo de bypass en el módulo 3 para alta y media irradiancia y RMSE para la reproducción de la curva I-V.

Irradiance	$\overline{I_{sat,db}}$ [A]	$\sigma(I_{sat,db})$	$\overline{\eta_{db}}$	$\sigma(\eta_{db})$	RMSE [V]	σ (RMSE)
High	1.455×10^{-2}	1.288×10^{-2}	3.388	1.288×10^{-2}	3.729×10^{-2}	1.292×10^{-2}
Medium	4.015×10^{-3}	6.952×10^{-3}	1.533	6.952×10^{-3}	9.672×10^{-3}	4.360×10^{-3}

Tabla 20. Voltaje térmico, temperatura del diodo de bypass y corriente de cortocircuito en el módulo 3 para alta y media irradiancia de los datos experimentales.

Irradiance	$\overline{V_{t,db}}$ [V]	$\sigma(V_{t,db})$ [V]	$\overline{T_{db}}$ [K]	$\sigma(T_{db})$ [K]	$\overline{I_{sc}}$ [A]	$\sigma(I_{sc})$ [A]
High	2.808×10^{-2}	2.397×10^{-4}	325.832	2.781	8.577	1.196×10^{-1}
Medium	2.683×10^{-2}	8.446×10^{-5}	311.388	9.801×10^{-1}	4.287	3.054×10^{-1}

En general, en las Tablas 15 y 16 se puede apreciar, que el promedio en los valores y la desviación estándar de los parámetros en el diodo de bypass del módulo 1 son del mismo orden. Con la reducción de la irradiancia se observa una reducción en la desviación estándar de $I_{sat,db}$ y η_{db} , así como en la reproducción de la curva I-V del diodo de bypass, comportamiento que también se replica en los módulos 2 y 3. No

obstante, vale la pena señalar que el valor más pequeño de $I_{sat,db}$ para el módulo 2 es obtenido para irradiancia media y no para irradiancia baja como para los otros módulos.

Los resultados muestran que el procedimiento propuesto permite calcular los parámetros para reproducir el comportamiento eléctrico de los diodos de bypass en un módulo fotovoltaico con valores RMSE inferiores a 31,15 mV. Teniendo en cuenta que no hay otro trabajo reportado en la literatura, que aborde la estimación de los parámetros de los diodos de bypass presentes en el panel solar de Trina Solar utilizado en este documento, es difícil calificar los errores obtenidos como bajos o altos. Sin embargo, para fines de contraste, los valores dados en las referencias ^{30 31} incluyen corrientes de saturación inversa del diodo entre $2\mu A$ ³⁰ y $10\eta A$ ³¹ y factores de idealidad entre 2 ³⁰ y 3.4 ³¹ para cualquier condición de irradiancia.

Los valores para $I_{sat,db}$ y ηdb expresados en ^{30 31} son solo con fines informativos y los autores no expresan a través de que método fueron obtenidos dichos valores. Además, en las referencias aunque se hacen pruebas a diferentes valores de irradiancia, no se puede evidenciar si los valores expresados cambian para cada valor de irradiancia. Por lo tanto, los valores de $I_{sat,db}$ utilizados en ^{30 31} pueden ser tres o seis ordenes de magnitud inferiores a los obtenidos en este documento, para altas irradiancias. Por otra parte, los valores de ηdb utilizados en ^{30 31} están cerca de los obtenidos en el método propuesto para altas irradiancias, pero pueden ser un orden de magnitud inferior a los utilizados en ^{30 31} para medias. Por lo tanto, si los valores de los parámetros presentados en ³⁰

³⁰ Guangyu Liu, Sing Kiong Nguang y Ashton Partridge. “A general modeling method for I-V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays”. En: Energy Convers. Manag. 52.12 (2011), págs. 3439-3445. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.07.011.

³¹ M. L. Orozco-Gutierrez y col. “A technique for mismatched PV array simulation”. En: Renew. Energy 55 (2013), págs. 417-427. DOI: 10.1016/j.renene.2013.01.009.

³¹ se consideran para cualquier condición de operación, el error en la reproducción de las curvas I-V de los diodos de bypass I-V puede aumentar, causando problemas en la reproducción de las curvas I-V en un generador fotovoltaico.

El procedimiento propuesto se puede utilizar para monitorear el estado de todos los diodos de bypass en un módulo mediante una estimación secuencial de cada uno de los parámetros del diodo. La información de todos los diodos de bypass se pueden utilizar para fines de diagnóstico o para cualquier aplicación que requiera el modelo de los diodos de bypass para reproducir el comportamiento eléctrico de generadores fotovoltaicos bajo condiciones de operación irregular. Esto podría ser una mejora para los modelos de arreglos fotovoltaicos donde se suponen que todos los parámetros de los diodos de bypass son iguales, incluso bajo diferentes condiciones de irradiancia ^{32 33 30}
³¹.

³² Daniel Gonzalez Montoya y col. “A procedure for modeling photovoltaic arrays under any configuration and shading conditions”. En: *Energies* 11.4 (2018), págs. 1-17. DOI: 10.3390/en11040767.

³³ Juan David Bastidas-Rodríguez y col. “General modeling procedure for photovoltaic arrays”. En: *Electr. Power Syst. Res.* 155 (2018), págs. 67-79. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.09.023.

6. CONCLUSIONES

En este documento, se presentan dos procedimientos no invasivos para estimar los parámetros $I_{sat,db}$ y η_{db} del modelo exponencial del diodo de bypass con el fin de reproducir el comportamiento en un panel FV. Los procedimientos se basan en las relaciones que existen entre las curvas I-V de un módulo FV con y sin sombreado. Estos procedimientos utilizan la adquisición de datos de tensión y corriente de un módulo cuando este se encuentra bajo condiciones regulares o irregulares de operación. Los métodos propuestos son no invasivos, porque no existe la necesidad de desconectar el diodo de bypass del módulo. Además, los pasos requeridos por los métodos propuestos tienen poca complejidad, ya que solo se requieren dos barridos de corriente, (con y sin sombreado), y no hay necesidad de identificar los parámetros del modelo del panel fotovoltaico.

Los dos procedimientos propuestos fueron validados utilizando simulaciones (Simulink), tomando como base el modelo de un panel FV comercial formado por tres módulos. En las simulaciones, los parámetros de todos los diodos de bypass se consideraron diferentes y el procedimiento propuesto se evaluó para alta ($1000 \frac{W}{m^2}$), media ($500 \frac{W}{m^2}$) y baja ($170 \frac{W}{m^2}$) irradiancia. Los errores en la estimación de parámetros fueron inferiores a 2.02 % y 0.17 % para $I_{sat,db}$ y η_{db} para el método basado en la sección 2.1. Para el método, en el que se aplica una sombra parcial a uno de los módulos, los errores fueron inferiores a 2.84 % y 0.29 % para $I_{sat,db}$ y η_{db} respectivamente. Además, los métodos entregan un error RMSE, en la reproducción de las curvas I-V de los diodos de bypass inferior a 1.43 mV cuando $I_m \approx 0A$ y de 5.1 mV cuando $I_m > 0A$ para todos los escenarios de irradiancia.

El método cuando se aplica una sombra total sobre el módulo e $I_m \approx 0A$, se validó mediante pruebas experimentales. Este método se aplicó a un panel fotovoltaico

comercial formado por tres módulos. Los parámetros de los tres diodos de bypass se estimaron para niveles de irradiancia alta, media y baja. Al realizarse alrededor de diez experimentos para cada escenario de irradiancia, el error RMSE, de la reproducción de las curvas I-V fue inferior a 9.7 mV y los resultados muestran que las magnitudes de los parámetros estimados se reducen cuando se reduce la irradiancia. Además, teniendo en cuenta que se realizaron alrededor de diez experimentos por cada escenario de irradiancia, los valores promedio y las desviaciones estándar de $I_{sat,db}$ y η_{db} sugieren que sería necesario considerar otros modelos para representar el diodo de bypass en cualquier condición de irradiancia. De lo contrario, los parámetros del modelo exponencial deben ajustarse si se requiere una mayor precisión.

Aunque, los métodos propuestos no pueden aplicar a los I-V tracer's disponibles en el mercado, debido a su precisión de medición ($\approx 1\%$). Es un trabajo futuro, desarrollar un dispositivo electrónico portátil capaz de implementar el procedimiento propuesto para complementar la información obtenida por los I-V tracer's. Del mismo modo, la siguiente etapa de este trabajo considera utilizar otros modelos para representar los diodos de bypass. Esto con el fin de reducir los errores en la reproducción del comportamiento eléctrico de los diodos de bypass para condiciones de irradiancia media y alta.

7. TRABAJO FUTURO

Se debe mejorar el método propuesto, a partir de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo. Utilizando otras aproximaciones para modelar el diodo de bypass, para así obtener valores de $I_{sat,db}$ y η_{db} más cercanos a los que se obtienen teóricamente. Sumado a esto, se deben ensayar otros métodos para la estimación de los parámetros $I_{sat,db}$ y η_{db} , ya que los parámetros obtenidos permiten reproducir con un buen ajuste la curva I.V del diodo de bypass, pero los valores de $I_{sat,db}$ y η_{db} difieren mucho de los valores teóricos que poseen estos parámetros.

Además, se debe desarrollar una metodología que permita analizar más de un diodo de bypass a la vez. Para esto, se deben considerar las curvas I-V donde se presenten más de un punto de inflexión. Con esto, se tendría una metodología más robusta, ya que permitiría estimar los parámetros de los $N_m - 1$ diodos de bypass activos en el panel. De igual manera se debe modificar y adaptar la metodología propuesta a cadenas y arreglos de paneles.

En futuras versiones del método, se debe procurar que el método tenga la capacidad de estimar los parámetros sin recurrir a forzar una sombra sobre el módulo a examinar. Una posible solución para esto es analizar la incidencia y la ocurrencia de los puntos de inflexión, para que estos tomen parte activa del procedimiento.

Una continuación de este trabajo consiste en desarrollar un dispositivo portátil que tome los datos de las curvas I-V y estime los parámetros del diodo de bypass, esto permitiría tener un dispositivo más completo, que los I-V tracer's de la actualidad. Ya que se tendría en un solo dispositivo, las capacidades del I-V tracer junto a la estimación de los parámetros de los diodos de bypass. Esto conllevaría a una mejora en el diagnóstico

del estado de los paneles fotovoltaicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Accarino, J. y col. "Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model". En: 4th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2013 (2013), págs. 62-66. DOI: 10.1109/ICCEP.2013.6586967 (vid. pág. 22).
- Bastidas, J. D. y col. "A model of photovoltaic fields in mismatching conditions featuring an improved calculation speed". En: Electric Power Systems Research 96 (2013), págs. 81-90. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.10.020 (vid. pág. 21).
- Bastidas-Rodríguez, Juan David y col. "General modeling procedure for photovoltaic arrays". En: Electr. Power Syst. Res. 155 (2018), págs. 67-79. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.09.023 (vid. pág. 85).
- B&K Precision Corp. 8500 Series DC Electronic Loads. 2009 (vid. pág. 72).
- Boylestad, Robert L y Louis Nashelsky. Electronic Devices and Circuit Theory. 2012, pág. 927. DOI: 10.1111/j.1728-4465.2014.00390.x (vid. pág. 20).
- Cengiz, Mehmet Sait y Mehmet Salih Mamiş. "Price-efficiency relationship for photovoltaic systems on a global basis". En: International Journal of Photoenergy 2015 (2015). DOI: 10.1155/2015/256101 (vid. pág. 18).
- Dhimish, By Mahmoud y col. "Detecting Defective Bypass Diodes in Photovoltaic Modules using Mamdani Fuzzy Logic System". En: (2017) (vid. pág. 23).
- Di Piazza, MariaCarmela y Gianpaolo Vitale. Photovoltaic Sources: Modelling and Emulation. 2013, pág. 296. DOI: 10.1007/978-1-4471-4378-9 (vid. pág. 37).

- Femia, Nicola y col. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. 2012, págs. 1-33. DOI: 10.1201/b14303-2 (vid. págs. 20, 27).
- Florida Solar Energy Center. Cells, Modules, and Arrays. 2018 (vid. pág. 26).
- Fu, Ran y col. “U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017 U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1 2017”. En: Nrel September (2017). DOI: 10.2172/1390776 (vid. pág. 18).
- Gonzalez Montoya, Daniel y col. “A procedure for modeling photovoltaic arrays under any configuration and shading conditions”. En: Energies 11.4 (2018), págs. 1-17. DOI: 10.3390/en11040767 (vid. pág. 85).
- Humada, Ali M. y col. “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review”. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews 56 (2016), págs. 494-509. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.051 (vid. pág. 22).
- Jung, W. y M. Guziewicz. “Schottky diode parameters extraction using Lambert W function”. En: Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology 165.1-2 (2009), págs. 57-59. DOI: 10.1016/j.mseb.2009.02.013 (vid. pág. 24).
- Kim, Katherine A. y Philip T. Krein. “Reexamination of Photovoltaic Hot Spotting to Show Inadequacy of the Bypass Diode”. En: IEEE Journal of Photovoltaics 5.5 (2015), págs. 1435-1441. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2444091 (vid. pág. 19).
- Ko, Suk Whan y col. “Electric and thermal characteristics of photovoltaic modules under partial shading and with a damaged bypass diode”. En: Energy 128 (2017), págs. 232-243. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.030 (vid. pág. 29).

- Köntges, M. y col. Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014, págs. 1-140. DOI: 978-3-906042-16-9 (vid. pág. 23).
- Liu, Guangyu, Sing Kiong Nguang y Ashton Partridge. “A general modeling method for I-V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays”. En: Energy Convers. Manag. 52.12 (2011), págs. 3439-3445. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.07.011 (vid. págs. 84, 85).
- Messenger, Roger A. y Jerry Ventre. Photovoltaic systems engineering. 2004, pág. 123. DOI: 10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C. arXiv: arXiv:1011.1669v3 (vid. pág. 18).
- Ocaya, R. O. “A current-voltage-temperature method for fast extraction of schottky diode static parameters”. En: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation 49.1 (2014), págs. 246-255. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.11.059 (vid. pág. 23).
- Orozco-Gutierrez, M. L. y col. “A technique for mismatched PV array simulation”. En: Renew. Energy 55 (2013), págs. 417-427. DOI: 10.1016/j.renene.2013.01.009 (vid. págs. 84, 85).
- Pearsall, Nicola. The performance of photovoltaic (PV) systems : modelling, measurement and assessment. 2017, pág. 348. DOI: 10.1016/B978-1-78242-336-2.09987-0 (vid. págs. 18, 54).
- Petrone, G. y C. A. Ramos-Paja. “Modeling of photovoltaic fields in mismatched conditions for energy yield evaluations”. En: Electric Power Systems Research 81.4 (2011), págs. 1003-1013. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.12.008 (vid. pág. 21).

- Petrone, Giovanni, Carlos Andrés Ramos-Paja y Giovanni Spagnuolo. Photovoltaic Sources Modeling. 2017, págs. 1-19. DOI: 10.1002/9781118755877.ch1 (vid. pág. 27).
- REN21. Renewables 2017: global status report. Vol. 72. October 2016. 2017, págs. 1256-1270. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.082 (vid. pág. 18).
- Rhouma, Mohamed B.H. y col. “A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model”. En: Renewable Energy 113 (2017), págs. 885-894. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.064 (vid. pág. 22).
- Shiradkar, Narendra, Vivek Gade y Kalpathy Sundaram. “Predicting service life of bypass diodes in photovoltaic modules”. En: 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015 (2015). DOI: 10.1109/PVSC.2015.7355606 (vid. pág. 23).
- Shiradkar, Narendra y col. “Effect of shading on the switching of bypass diodes in PV modules”. En: 9179 (2014), pág. 91790C. DOI: 10.1117/12.2062470 (vid. págs. 22, 23).
- Tang, Aik Yean y col. “Analytical extraction of a schottky diode model from broadband S-parameters”. En: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 61.5 (2013), págs. 1870-1878. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2251655 (vid. pág. 24).
- Trina Solar Energy Co., Ltd. “Trina Solar Honey Modul, TSM-PD05”. En: (2016), págs. 1-2 (vid. págs. 52, 72).
- Vélez-Sánchez, Jeisson y col. “A Non-Invasive Procedure for Estimating the Exponential Model Parameters of Bypass Diodes in Photovoltaic Modules”. En: Energies 12.2 (2019), pág. 303. DOI: 10.3390/en12020303 (vid. pág. 72).

Wuxi China Resources Huajing Microelectronics CO. Silicon N-type Schottky rectifier diode. China (vid. págs. 52, 54).

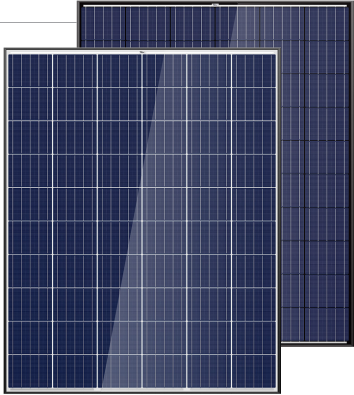
Zheng, Huiying y col. “Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations”. En: Renewable Energy 68 (2014), págs. 58-66. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.025 (vid. pág. 19).

ANEXOS

Anexo A. Especificaciones técnicas panel solar

Mono
Multi
Solutions

THE ALLMAX MODULE



60 CELL
MULTICRYSTALLINE MODULE

255-270W
POWER OUTPUT RANGE

16.5%
MAXIMUM EFFICIENCY

0~+5W
POSITIVE POWER TOLERANCE



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 62716
- ISO 9001: Quality Management System
- ISO 14001: Environmental Management System
- ISO 14064: Greenhouse Gases Emissions Verification
- OHSAS 18001: Occupation Health and Safety Management System










Trina Solar Limited
www.trinasolar.com

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 Year Product Warranty - 25 Year Linear Power Warranty



Additional output from Trina Solar's power warranty

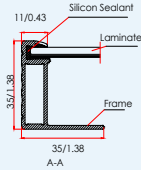
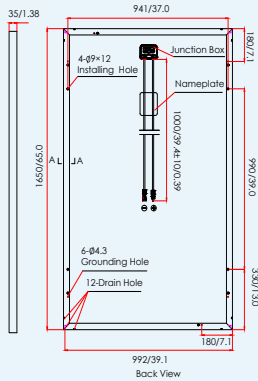
Trinasolar

Smart Energy Together

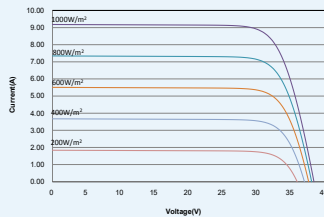
THE ALLMAX MODULE

PRODUCTS	POWER RANGE
TSM-PD05.08	260-270W
TSM-PD05.05	255-265W

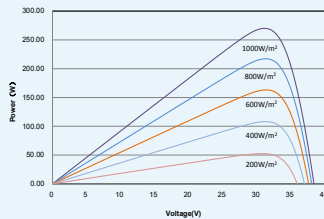
DIMENSIONS OF PV MODULE
unit:mm/inches



I-V CURVES OF PV MODULE (270W)



P-V CURVES OF PV MODULE (270W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- P_{MAX} (Wp)*	255	260	265	270
Power Output Tolerance- P_{MAX} (W)	0 ~ +5			
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	30.5	30.6	30.8	30.9
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	8.37	8.50	8.61	8.73
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	38.1	38.2	38.3	38.4
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	8.88	9.00	9.10	9.18
Module Efficiency η_m (%)	15.6	15.9	16.2	16.5

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.
*Test tolerance: $\pm 3\%$.

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power- P_{MAX} (Wp)	189	193	197	200
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	28.2	28.4	28.6	28.7
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	6.71	6.81	6.89	6.97
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	35.3	35.4	35.5	35.5
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	7.17	7.27	7.35	7.41

NOCT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Multicrystalline 156 × 156 mm (6 inches)
Cell Orientation	60 cells (6 × 10)
Module Dimensions	1650 × 992 × 35 mm (65.0 x 39.1 x 1.38 inches)
Weight	18.6 kg (41.0 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Tempered Glass
Backsheet	White (PD05.08); Black (PD05.05)
Frame	Black (PD05.08, PD05.05)
J-Box	IP 67 or IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm ² (0.006 inches ²), 1000 mm (39.4 inches)
Connector	MC4 Compatible or Amphenol H4/UTX
Fire Type	Type 1 or Type 2

TEMPERATURE RATINGS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	44°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)
Temperature Coefficient of P_{MAX}	-0.41%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC}	-0.32%/°C
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.05%/°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000V DC (IEC) 1000V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	15A

WARRANTY

10 year Product Workmanship Warranty
25 year Linear Power Warranty
(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 30 pieces
Modules per 40' container: 840 pieces

Anexo 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, $T_a=25^{\circ}C$)

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	$^{\circ}C$
贮存温度	T_{stg}	-55~150	$^{\circ}C$
结到壳的热阻	$R_{\theta JC}$	1.6	$^{\circ}C/W$

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

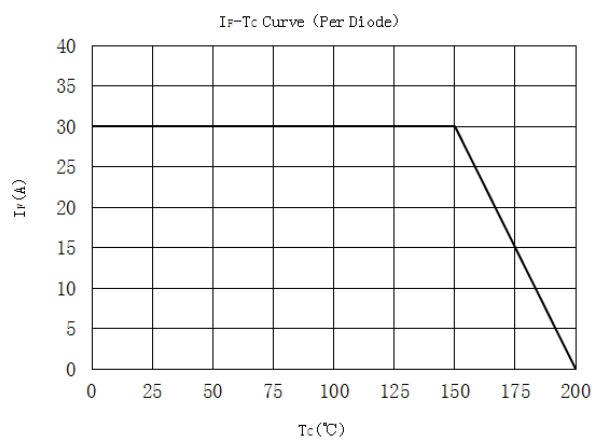
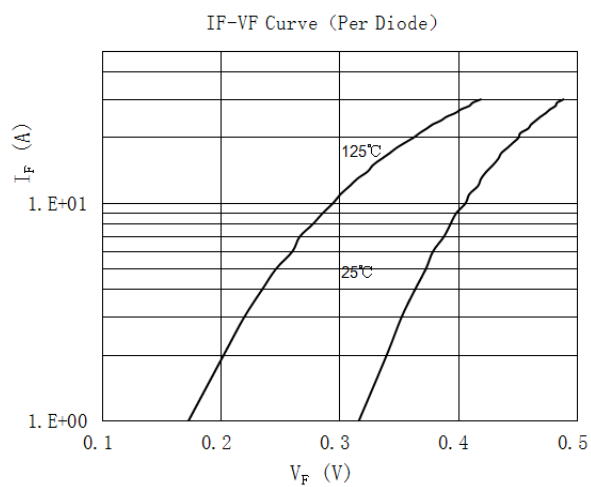
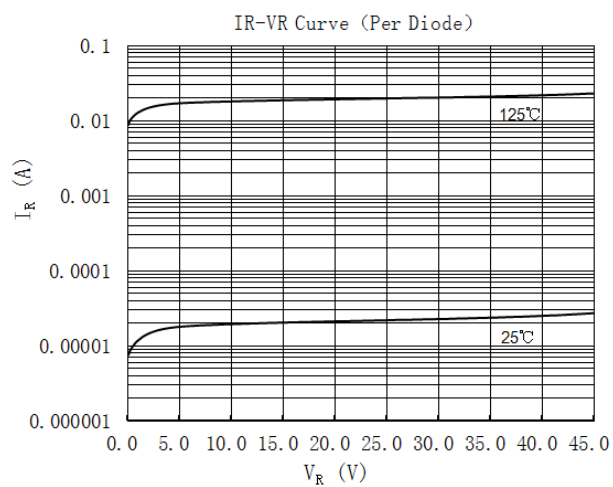
参 数 名 称	符 号	测 试 条 件	规 范 值			单 位
			最小	典型	最大	
击穿电压	V_{BR}	$I_R=500\mu\text{A}$	45			V
正向压降	V_F^*	$I_F=20\text{ A}, T_j=25^{\circ}\text{C}$		0.45	0.49	V
		$I_F=30\text{ A}, T_j=25^{\circ}\text{C}$		0.5	0.55	V
反向漏电流	I_R^*	$V_R=45\text{ V}, T_j=25^{\circ}\text{C}$			0.1	mA
		$V_R=45\text{ V}, T_j=125^{\circ}\text{C}$			50	mA

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

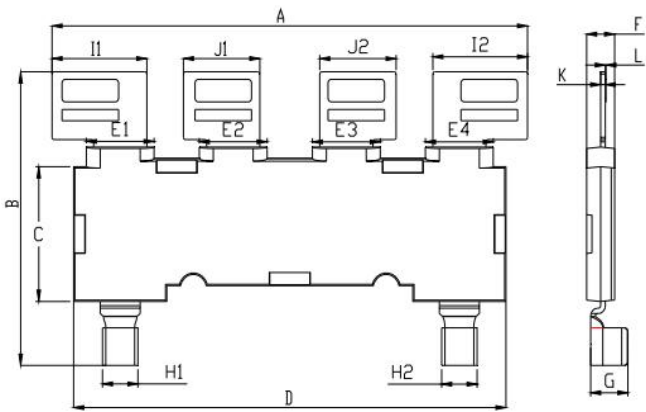
有害物质说明

部件名称 (含量要求)	有毒有害物质或元素									
	铅 Pb	汞 Hg	镉 Cd	六价铬 Cr(VI)	多溴 联苯 PBB	多溴二 苯醚 PBDE	邻苯二 甲酸二 异丁酯 DIBP	邻苯二 甲酸酯 DEHP	邻苯二 甲酸二 丁酯 DBP	邻苯二 甲酸丁 苄酯 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	○: 表示该元素的含量在 2011/65/EU 标准的限量要求以下。 ×: 表示该元素的含量超出 2011/65/EU 标准的限量要求。 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。									

特性曲线



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: 0510-8580 7228 传真: 0510-8580 0864
 市场营销部 邮编: 214061 电话: 0510-8180 5277 / 8180 5336
 传真: 0510-8580 0360 / 8580 3016
 应用服务 电话: 0510-8180 5243 传真: 0510-8180 5110

Anexo C. Especificaciones técnicas BK precision 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.

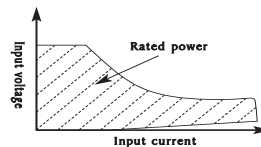
The DC loads are easy to use. All parameters can be set quickly and precisely from the front panel, or programmed via USB interface.

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.



Technical data subject to change
© B&K Precision Corp. 2018

www.bkprecision.com



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 mA/1 mV) voltage and current measurement (models 8500 & 8502)
- Bright, easy to read display (VFD technology)
- Over-Current/Over-Voltage/Over-Power/Over-Temperature Protection
- USB to TTL serial converter cables and application software included

- List 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
- Thermostatically-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

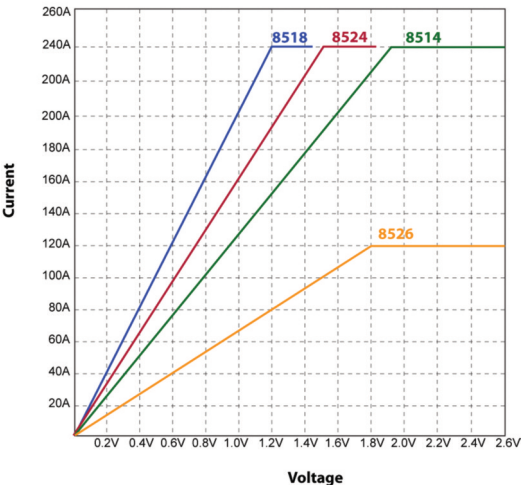


Applications:

- 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
1.05 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

▲ 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

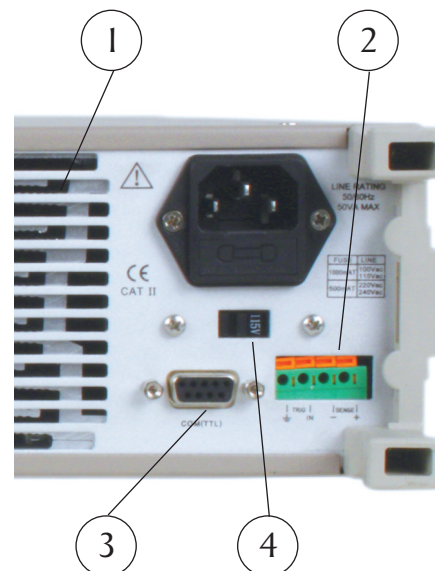
Connect sensing lines to this terminal to compensate for voltage drops due to load wire resistance. This terminal block also contains the two connections for the remote TTL trigger input signal.

3) Interface connection

Serial interface connector for USB communication.

4) Voltage switch

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



▲ 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

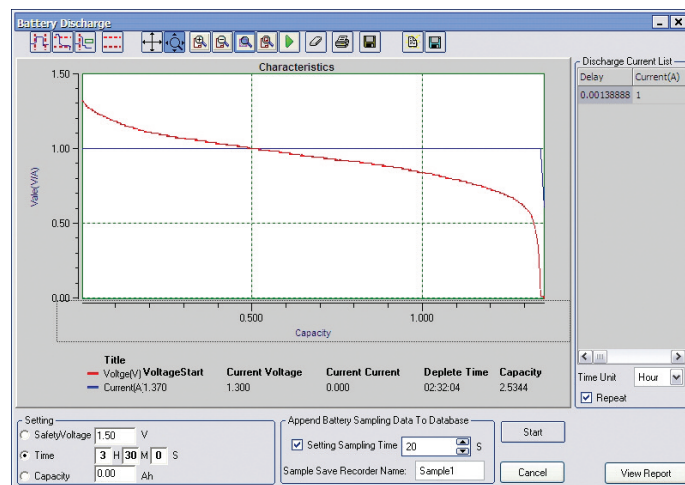
The DC loads can be remotely controlled from any PC with USB interface, allowing the user to fully program and monitor all parameters. USB to TTL serial converter cables are included. For users wanting to write their own custom software, a set of example programs are available for download on the B&K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

Specifications

▲ Models 8500 & 8502 (300 W)

Parameter		8500	8502
Input rating	Voltage	0 – 120 V	0 – 500 V
	Current	0 – 30 A	0 – 15 A
	Power	300 W	

Parameter	Range		Accuracy	Resolution
	8500	8502		
CV Mode	0.1-18 V		$\pm(0.05\%+0.02\% \text{ FS})$	1 mV
Regulation	0.1 – 120 V	0.1 – 500 V	$\pm(0.05\%+0.025\% \text{ FS})$	10 mV
CC Mode	0 – 3 A	0 – 3 A	$\pm(0.1\%+0.1\% \text{ FS})$	0.1 mA
Regulation	0 – 30 A	0 – 15 A	$\pm(0.2\%+0.15\% \text{ FS})$	1 mA
Current Measurement	0 – 3 A	0 – 3 A	$\pm(0.1\% + 0.1\% \text{ FS})$	0.1 mA
	0 – 30 A	0 – 15 A	8500: $\pm(0.2\%+0.15\% \text{ FS})$ 8502: $\pm(0.2\%+0.3\% \text{ FS})$	1 mA
Voltage Measurement	0-18 V		$\pm(0.02\% + 0.02\% \text{ FS})$	1 mV
	0-120 V	0 – 500 V	$\pm(0.02\% + 0.025\% \text{ FS})$	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 Regulation	0.1-18 V				±(0.05%+0.02% FS)	1 mV
	0.1 V to Vmax				±(0.05%+0.025% FS)	10 mV
CC Mode Regulation	0-12 A	0-3 A	0-24 A		±(0.1%+0.1% FS)	1 mA
	0 – max Current				±(0.2%+0.15% FS)	10 mA
Current Measurement	0-12 A	0-3 A	0-24 A		±(0.1% + 0.1% FS)	1 mA
	0 – max. Current				±(0.2%+0.15% FS)	10 mA
Voltage Measurement	0 – 18 V				8510/8514: (0.02% + 0.025% FS) 8512/8518: (0.02% + 0.02% FS)	1 mV
	0 - Vmax				±(0.02% + 0.025% 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				$\pm(0.05\%+0.02\% \text{ FS})$	1 mV
Regulation	0.1 V to Vmax				$\pm(0.05\%+0.025\% \text{ FS})$	10 mV
CC Mode	0-24 A	0-12 A	0-24 A	0-12 A	$\pm(0.1\%+0.1\% \text{ FS})$	1 mA
Regulation	0 – max Current				$\pm(0.2\%+0.15\% \text{ FS})$	10 mA
Current Measurement	0-24 A	0-12 A	0-24 A	0-12 A	$\pm(0.1\% + 0.1\% \text{ FS})$	1 mA
	0 – max. Current				$\pm(0.2\%+0.15\% \text{ FS})$	10 mA
Voltage Measurement	0 – 18 V				8522/8526: $(0.02\% + 0.02\% \text{ FS})$ 8520/8524: $(0.02\% + 0.025\% \text{ FS})$	1 mV
	0 - Vmax				$\pm(0.02\% + 0.025\% \text{ FS})$	10 mV

▲ Common characteristics

Parameter	Range	Accuracy	Resolution
CR Mode Regulation			
(Input current ≥FS 10% Input voltage≥FS 10%)	0.1 -10 Ω	±(1%+0.3% FS)	0.001 Ω
	10-99 Ω	±(1%+0.3% FS)	0.01 Ω
	100-999 Ω	±(1%+0.3% FS)	0. 1 Ω
	1K-4 KΩ	±(1%+0.8% FS)	1 Ω
CW Mode Regulation			
(Input current ≥FS 10% Input voltage≥FS 10%)	0-100 W	±(1%+0.1% FS)	1 mW
	100 W - max power	±(1%+0.1% FS)	100 mW
Power Measurement			
(Input current ≥ FS 10% Input voltage ≥ FS 10%)	0-100 W	±(1%+0.1% FS)	1 mW
	100 W - max power	±(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 0.5%		
AC input	110 / 220 (see note below)* VAC ± 10%, 47 – 63 Hz		
Operating temperature	32 °F - 104 °F (0 - 40 °C)		
Storage temperature	50 °F - 140 °F (10 - 60 °C)		
Humidity	≤ 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