

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Estimación de factores de sombreado en un pequeño generador fotovoltaico operando en
condiciones no homogéneas

Juan Diego Calderón Franco y Daniel José Arguello Hernández

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Michael Arenas Flórez

Magister en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Iván David Serna Suarez

Doctor of Philosophy - PhD Power system planning and operation

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

“Dedico este logro a todas las personas que estuvieron a mi lado durante este proceso. A mi amada familia, quienes me brindaron la oportunidad de demostrarme a mí mismo que puedo alcanzar cualquier meta que me proponga. A mis leales compañeros y amigos, quienes compartieron conmigo lo más valioso que poseemos como seres humanos: el conocimiento. Al final, este logro no solo es mío, sino de todos ustedes, quienes me inspiraron y apoyaron en este camino hacia el éxito.”

Juan Diego Calderón Franco

"Dedico este logro a Dios, cuya guía y fortaleza han sido mi luz en los momentos de oscuridad. A mis amados padres, cuyo sacrificio, apoyo y amor incondicional me han permitido ser lo que soy. A mi querida hermana, compañera de vida y ejemplo a seguir, gracias por el apoyo constante.

A todas las personas que estuvieron a mi lado a lo largo de este camino, su aliento y apoyo son invaluable. A aquellos que me quieren y a quienes yo quiero, su amor y amistad son un tesoro en mi vida. Este logro es un reflejo de la contribución y el cariño de todos ustedes por eso agradezco a Dios y a la vida por ser mi inspiración y mi motivo para esforzarme constantemente."

Daniel José Arguello Hernández

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Agradecimientos

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todos aquellos que contribuyeron de manera significativa al éxito de este proyecto. En primer lugar, deseamos agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo esta investigación y por su constante apoyo en nuestro camino académico.

Nuestro más profundo agradecimiento va dirigido a nuestro director de proyecto, Michael Arenas y nuestro codirector, Iván Andrés Serna. Su paciencia, enseñanza y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo, su dedicación y sabiduría nos guiaron en cada paso del proceso, y estamos enormemente agradecidos por su compromiso y voluntad.

También queremos expresar nuestro agradecimiento a la profesora María Alejandra Mantilla y a Mónica Botero por su disposición en el préstamo y uso de los distintos elementos utilizados en el proyecto. Agradecemos a todos los profesores que generosamente compartieron su conocimiento con nosotros y a nuestros compañeros de clase, con quienes desarrollamos amistades y vivimos experiencias a lo largo de este camino académico.

Por último, pero no menos importante, queremos agradecer de todo corazón a nuestras familias que con esfuerzo y sacrificio, brindaron todo de sí para respaldarnos en cada momento. Su apoyo inquebrantable nos dio la fuerza necesaria para enfrentar los desafíos que surgieron en este proyecto y en nuestra formación académica en general.

Estamos sinceramente agradecidos con todos ustedes por ser parte fundamental de este logro y por compartir este emocionante camino con nosotros.

¡Muchas gracias!

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Fundamentos y modelado de generadores fotovoltaicos	15
2. Metodología experimental	25
2.1 Elementos utilizados	25
2.1.1 Panel solar	25
2.1.2 Banco de reóstatos	26
2.1.3 Multímetro	26
2.1.4 Piranómetro	27
2.1.5 Termómetro	28
2.1.6 Dispositivo de medición PowerCheck	28
2.1.7 Software PWRcheck	29
2.1.8 Elemento de sombreado	30
2.2 Conexión	32
3. Metodología de muestreo	33
3.1 Sin sombra	33
3.2 Sombreado parcial por celdas por submódulo	36
3.3 Sombreado parcial por submódulo	39
3.4 Sombreado parcial de los submódulos bajo distintas condiciones	42
4. Metodología para la estimación del factor de sombreado en el Modelo del diodo simple en paneles fotovoltaicos	44
4.1 Diseño del Sistema de medición experimental	46

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

4.2 Toma de datos	46
4.3 Implementación del modelo matemático	47
4.4 Implementación del método numérico de Newton-Raphson.....	48
4.5 Estimación de parámetros.....	48
4.6 Ajuste de parámetros.....	50
4.7 Consideraciones escalables.....	52
4.8 Identificación e incorporación del F_s al modelo	53
5. Conclusiones	58
6. Recomendaciones	60
Referencias bibliográficas.....	61
Apéndices.....	64

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Valores iniciales para la estimación de los parámetros SDM</i>	49
Tabla 2 <i>Valores obtenidos para los parámetros SDM</i>	50
Tabla 3 <i>Valores de los parámetros SDM ajustados</i>	52
Tabla 4 <i>Parámetros para la curva I-V con 1 submódulo sombreado parcialmente</i>	55
Tabla 5 <i>Parámetros curva I-V con 2 submódulos con igual sombreado parcial</i>	56
Tabla 6 <i>Parámetros para la curva I-V con sombreado en 2 submódulos, cada uno afectado por un sombreado distinto</i>	57

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Gráfico I-V	17
Figura 2 Efectos de sombreado en el SFV	18
Figura 3 Modificación de la curva I-V debido a R_s y R_h	23
Figura 4 Modificación de la curva I-V debido a la variación en los parámetros de MDS	24
Figura 5 Panel Upsolar UP-M250P	25
Figura 6 Reóstato Cenco.....	26
Figura 7 Multímetro digital Fluke 179.....	26
Figura 8 Piranómetro SM206.....	27
Figura 9 Termómetro Fluke 568	28
Figura 10 PWRcheck	29
Figura 11 Interfaz software PWRcheck.....	29
Figura 12 Tejido de polipropileno	30
Figura 13 Bolsa de polietileno	31
Figura 14 Parasol	31
Figura 15 Diagrama representativo de la conexión realizada.....	32
Figura 16 Representación panel sin sombra	34
Figura 17 Panel utilizado	34
Figura 18 Curva I-V del panel sin sombra.....	35
Figura 19 Curva P-V del panel sin sombra.....	35
Figura 20 Representación Panel con sombra en celdas de la misma columna	36
Figura 21 Panel con parasol en una celda.....	37

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 22 Panel con parasol en dos celdas.....	37
Figura 23 Comparación de curvas I-V con una y dos celdas sombreadas de un mismo submódulo	38
Figura 24 Comparación de curvas P-V con una y dos celdas sombreadas de un mismo submódulo.	38
Figura 25 Numeración columnas panel	39
Figura 26 Representación Panel con sombra en columnas del mismo submódulo	40
Figura 27 Panel con columna de celdas sombreada.....	40
Figura 28 Comparación de curvas I-V con una y dos columnas de un submódulo sombreadas.	41
Figura 29 Comparación de curvas P-V con una y dos columnas de un submódulo sombreadas	41
Figura 30 Representación sombreado de submódulos con distinta sombra	42
Figura 31 Curva I-V con panel bajo condiciones distintas de sombreado.....	43
Figura 32 Curva P-V condiciones distintas de sombreado	43
Figura 33 Diagrama de flujo de la metodología propuesta.....	45
Figura 34 Curvas I-V experimental vs teórica sin ajustar.....	50
Figura 35 Curvas I-V experimental vs teórica ajustada.....	51
Figura 36 Curva I-V con sombreado parcial en 1 submódulo	54
Figura 37 Curva I-V con igual sombreado parcial en 2 submódulos	55
Figura 38 Curva I-V con sombreado en 2 submódulos, cada uno afectado por un sombreado distinto.....	56

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Fichas técnicas y manuales.	64
Apéndice B Códigos utilizados para los modelos matemáticos y gráficas.	64
Apéndice C Base de datos con las muestras tomadas experimentalmente.	64

Resumen

Título: Estimación de factores de sombreado en un pequeño generador fotovoltaico operando en condiciones no homogéneas*

Autor: Juan Diego Calderón Franco y Daniel José Arguello Hernández**

Palabras Clave: Energía FV, Factor de sombreado, Medición de curvas I-V y P-V, Modelo del generador FV, Pérdidas de potencia, Sombreados parciales

Descripción: El trabajo de grado tiene como objetivo principal establecer una metodología para la medición experimental de factores de sombreado que influyen en un generador fotovoltaico. Este enfoque se basa en la medición de diferentes condiciones de sombreado, teniendo en cuenta variables como la temperatura ambiente e irradiancia. El propósito fundamental de este trabajo es contribuir significativamente al dimensionamiento, diseño futuro y estudio del modelado de sistemas de generación fotovoltaica.

El sombreado parcial representa un desafío importante en la eficiencia y modelado de los paneles solares y consecuentemente en el dimensionamiento y durabilidad del sistema. La solución que se propone en este proyecto implica el desarrollo de una metodología para estimar los factores de sombreado y la validación experimental de un modelo matemático existente que permitirá predecir el rendimiento de los paneles solares en situaciones de sombreado parcial.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Michael Arenas Flórez. Magister en Ingeniería eléctrica. Codirector: Iván David Serna Suarez. Doctor en Filosofía – PhD Planificación y operación de sistemas de energía

Abstract

Title: Estimation of shading factors in a small photovoltaic generator operating under non-homogeneous conditions.*

Author(s): Juan Diego Calderón Franco and Daniel José Arguello Hernández **

Key Words: I-V and P-V Curve Measurements, PV Energy, PV Generator Model, Partial Shadings, Power Losses, Shading Factor

Description: The main objective of this thesis is to establish a methodology for the experimental measurement of shading factors that affect a photovoltaic generator. This approach is based on measuring different shading conditions, taking into account variables such as ambient temperature and irradiance. The fundamental purpose of this work is to significantly contribute to the sizing, future design, and modeling study of photovoltaic generation systems.

Partial shading poses a significant challenge in the efficiency and modeling of solar panels, and consequently in the sizing and durability of the system. The solution proposed in this project involves the development of a methodology to estimate shading factors and the experimental validation of an existing mathematical model that will allow predicting the performance of solar panels in partial shading situations.

* Undergraduate Work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Advisor: Michael Arenas Flórez, Master's in Electrical Engineering. Co-advisor: Iván David Serna Suárez, Doctor of Philosophy - PhD in Power System Planning and Operation.

Introducción

La importancia de modelar el comportamiento de los paneles bajo diferentes sombreados es crucial para predecir su rendimiento y aprovechar su potencial de generación de energía limpia. Sin una adecuada comprensión del impacto del sombreado, se pueden tomar decisiones equivocadas en la planificación y diseño de sistemas fotovoltaicos, lo que puede resultar en una menor producción de energía y una inversión no rentable. El sombreado puede afectar un sistema fotovoltaico de varias maneras: puede causar desequilibrios en el sistema, ya que los paneles generarían menos potencia de la esperada; fluctuaciones en la corriente y la tensión en el sistema; aumento de la temperatura en los paneles, lo que se conoce comúnmente como puntos de calor, lo cual provocaría sobrecargas aumentando el riesgo de fallos y reduciendo la vida útil de los componentes.

La problemática principal se encuentra en la identificación de los parámetros requeridos para el modelado de estos sistemas, ya que estos valores son desconocidos en su mayoría, esto debido a que no son proporcionados por el fabricante explícitamente, y aun si lo fuesen, estos parámetros varían para cada módulo de forma irregular, dependiendo de su tiempo de uso y otros factores externos. Esto genera que la representación de la curva I-V por medio de un modelo sea imprecisa o muy alejada de la realidad. Si bien se han realizado estudios para estimar algunos de estos parámetros como lo hicieron (Gómez & Niño, 2021) con I_s y n_{db} , (Adamo, Attivissimo, Di Nisio, Lanzolla, & Spadavecchia, 2009) con R_s y R_h o los 5 parámetros juntos utilizando diferentes métodos, como por ejemplo (Fuentes, 2020) quien implementó un algoritmo PSO u optimización por enjambre de partículas (Di Gangi & Orioli, 2012) quienes propusieron un modelo basado en datos tabulares de rendimiento, (Lineykin, Averbukh, & Kuperman, 2013) que combinan soluciones de ecuaciones algebraicas con algoritmos o (Batzelis & Papathanassiou,

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

2015) quienes introducen un conjunto de expresiones analíticas para determinar los cinco parámetros del modelo sin procedimientos iterativos, alegando que estos consumen mucho tiempo y son propensos a dificultades de inicialización y convergencia. Sin embargo, no se han realizado estudios específicos sobre la estimación del factor de sombreado F_s que modifica a la corriente I_{ph} utilizada en el modelo del diodo simple. La estimación de este factor es importante debido a que, si no se conoce su valor, la curva I-V graficada por el modelo no podrá reproducir eficazmente los valores de corriente del generador cuando se ve afectado por un sombreado parcial. Muchos diseños de sistemas fotovoltaicos no tienen en cuenta el impacto del sombreado, lo que resulta en una menor producción de energía debido al sub-dimensionamiento del sistema, una inversión no rentable y una reducción en la vida útil de los componentes del sistema.

En este trabajo, se analizó el efecto del sombreado en la eficiencia de un generador fotovoltaico mediante mediciones experimentales. Se propuso estimar los factores F_s utilizando las curvas I-V y luego incorporarlos en un modelo de diodo simple. El enfoque del proyecto consiste en determinar si un modelo matemático puede describir con precisión el comportamiento de los paneles solares bajo diferentes condiciones de sombreado. El objetivo es desarrollar una metodología precisa para estimar el factor F_s , que afecta al módulo y ajusta el modelo del diodo simple, permitiendo así representar eficazmente las curvas I-V del generador en diversas condiciones de sombreado parcial. Este modelo estimado proporcionará una base sólida para el estudio del comportamiento y rendimiento de los paneles, tanto en aplicaciones de aprovechamiento de energía y diseño de sistemas fotovoltaicos, como en investigaciones futuras basadas en el modelo implementado. Este enfoque fomenta el desarrollo y la investigación en el campo de la energía solar como una fuente de energía limpia, al proporcionar una comprensión más completa del impacto del sombreado en la eficiencia de los paneles.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una metodología para la determinación de los factores de sombreado en un pequeño GFV operando en condiciones de sombreado parcial a partir de la medición de curvas características I-V y P-V para evaluar el impacto en la generación de energía.

Objetivos Específicos

Diseñar el montaje del sistema de medición para evaluar el impacto del sombreado en un pequeño GFV, seleccionando los equipos y elementos necesarios para tomar mediciones precisas y fiables

Realizar mediciones experimentales de las curvas I-V y P-V en un pequeño GFV operando en diferentes escenarios de sombreado parcial para evaluar el impacto en la eficiencia del generador.

Establecer una metodología para calcular los factores de sombreado en un pequeño GFV mediante la adaptación de uno o más modelos matemáticos circuitales existentes.

1. Fundamentos y modelado de generadores fotovoltaicos

La energía solar se refiere a la radiación electromagnética que es emitida por el sol en forma de luz y calor, siendo capturada y convertida en energía útil a través de tecnologías diseñadas para este fin (Velasco, 2012). Es considerada como una fuente de energía renovable y sostenible debido a la inagotable radiación proveniente del sol (IDEAM, 2023). La radiación solar constituye la fuente primaria para la generación de energía solar y otros procesos naturales en el planeta, una vez alcanza la Tierra, puede ser absorbida, reflejada o dispersada por la atmósfera y la superficie terrestre, su captura y conversión en electricidad o calor se lleva a cabo principalmente a través de dispositivos conocidos como paneles solares, que aprovechan el proceso llamado efecto fotovoltaico para transformar la radiación solar en energía utilizable (Iberdrola, s.f). De esta manera, la energía solar se ha convertido en una fuente versátil y cada vez más importante de energía limpia y sostenible que tiene aplicaciones en muchas áreas y actividades de la vida humana. La radiación solar está formada por luz visible, rayos ultravioletas y rayos infrarrojos, los cuales tienen un impacto en la Tierra que varía según el ángulo con el que incide, lo que da lugar a tres tipos de radiación: directa, difusa y reflejada. La cantidad de radiación solar por unidad de área se denomina irradiancia y se mide en Vatios por metro cuadrado (W/m^2).

Un sistema fotovoltaico se compone de varios elementos esenciales, que incluyen paneles solares, inversores y dispositivos de monitoreo. Su principal objetivo es aprovechar la radiación solar y convertirla en electricidad, ya sea en forma de corriente continua (CC) o corriente alterna (CA), para su uso en aplicaciones residenciales, comerciales o industriales (Lamigueiro, Santos, & Castro, 2012). Este sistema, ampliamente disponible en el mercado, consta de múltiples componentes, siendo la célula fotovoltaica el elemento fundamental en cualquier instalación solar.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Las células fotovoltaicas, también conocidas como células solares, son las unidades más pequeñas de un panel solar y están diseñadas para convertir directamente la radiación solar en electricidad de corriente continua (CC) mediante el efecto fotovoltaico (Tobajas, 2019). Estas células se conectan en serie para aumentar la tensión y formar submódulos. Cada submódulo suele incluir un diodo de bypass, cuya función es reducir las pérdidas de potencia en caso de sombreado parcial o total, permitiendo que la corriente excedente fluya sin afectar el rendimiento del submódulo y evitando que trabaje en condiciones desfavorables. En algunos casos, los módulos solares pueden constar de dos o más submódulos conectados en serie, lo que aumenta la tensión en los terminales. Esta configuración se utiliza para cumplir con los requisitos de tensión tanto para el banco de baterías como para el regulador diseñado para el sistema, contribuyendo a optimizar la eficiencia y el rendimiento global del sistema fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico es el proceso mediante el cual la energía luminosa transportada por los fotones de la luz se transforma en energía eléctrica al hacer que los electrones se desplacen a través de un circuito externo en un material semiconductor. La luz solar consta de fotones con diversas energías relacionadas con diferentes longitudes de onda en el espectro solar. Cuando estos fotones llegan a una célula fotovoltaica, pueden reflejarse, absorberse o atravesarla. Los fotones absorbidos transfieren su energía a los electrones de los átomos en la célula. Para generar una corriente eléctrica útil, es fundamental evitar que los electrones liberados vuelvan a unirse a los "huecos". Esto se logra mediante la introducción de elementos químicos llamados dopantes en el material semiconductor, los cuales aumentan la concentración de electrones y huecos, alterando las propiedades intrínsecas del material mediante el proceso de dopado (Barrera, 2010).

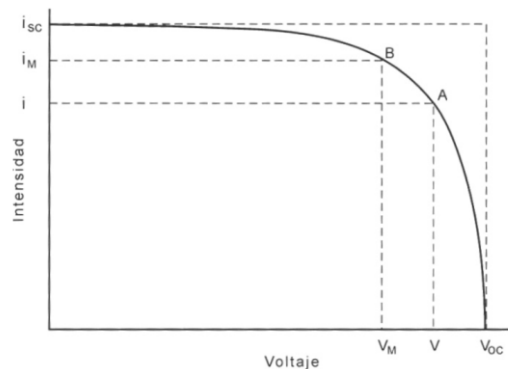
La curva corriente-tensión (ver Figura 1), es un gráfico que ilustra la relación entre la corriente eléctrica (I) y la tensión (V) en un dispositivo, desempeña un papel fundamental en la

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

caracterización y análisis de dispositivos electrónicos ya que representa cómo varía la corriente eléctrica generada por el dispositivo en función de la tensión aplicada o de la radiación solar incidente, esta curva exhibe un punto de máxima potencia eléctrica, conocido como "Punto de Potencia Máxima" (PPM). Este punto corresponde a la situación en la cual la célula o el panel solar generan la máxima cantidad de energía eléctrica bajo condiciones específicas de intensidad luminosa y temperatura. El PPM es de suma importancia en el diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos, ya que representa la combinación óptima de corriente y tensión para lograr la máxima producción de energía (Barrera, 2010).

Figura 1

Gráfico I-V



Nota. El gráfico representa la curva tensión-corriente general de un panel fotovoltaico donde el punto A es un punto cualquiera que representa el funcionamiento del panel bajo condiciones estándar. El punto B, el cual hace que el área del rectángulo sea la mayor posible, dicho punto representa la potencia máxima. Tomado de *Energía Solar* (p. 26), por M. Barrera, 2010, Liber Factory.

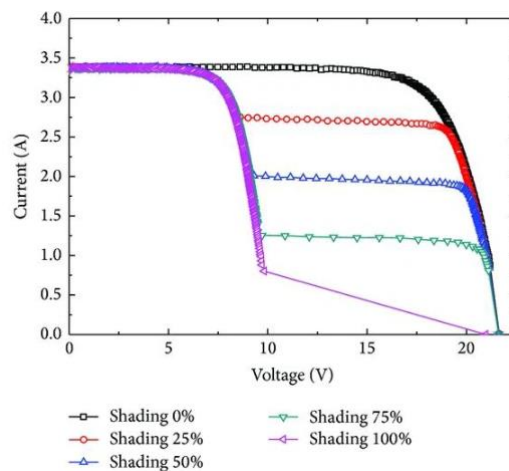
El sombreado parcial se presenta cuando la parte de un panel solar o de un conjunto de paneles solares está expuesta a la sombra, mientras que otra parte recibe la luz solar directa, puede

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

ser causado por diversas razones, como la presencia de edificios cercanos, árboles, antenas u otros obstáculos que bloquean parcialmente la luz del sol. El sombreado parcial puede tener un impacto negativo en la eficiencia de un sistema fotovoltaico, ya que reduce la cantidad de radiación solar que llega a las células fotovoltaicas sombreadas creando una desigualdad en la generación de electricidad dentro del panel provocando una serie de problemas, como la pérdida de potencia y la disminución del rendimiento general del sistema. En la Figura 2 se puede observar distintos módulos con distintos tipos de sombreado.

Figura 2

Efectos de sombreado en el SFV



Nota. El grafico muestra la curva I-V bajo condiciones de sombreado de 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Tomado de *Shading Effect on Output of Solar PV System.* (s.f.). DSI Solar.

La ecuación de Shockley es una simplificación teórica que ayuda a modelar el comportamiento del diodo ideal, pero que no considera varias condiciones y efectos presentes en diodos reales. En su desarrollo, no se contemplan las resistencias en las regiones neutras del diodo ni las resistencias de contacto; tampoco se abordan procesos como la generación y recombinación

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

de portadores en la región de carga espacial de la juntura PN. En diodos reales, la corriente de polarización inversa suele ser significativamente mayor que la corriente I_s debido a efectos secundarios que no se reflejan en la ecuación de Shockley (1), estos pueden deberse a imperfecciones en el proceso de fabricación del dispositivo y pueden ser difíciles de tener en cuenta de manera precisa. A pesar de estas diferencias, la corriente I_s determinada por la ecuación de Shockley suele ser lo suficientemente pequeña como para ser despreciada en la mayoría de los cálculos en circuitos con diodos, al menos como una primera aproximación. No obstante, para mejorar la precisión de los modelos, es común modificar la ecuación de Shockley incorporando un factor de idealidad η , cuyo valor oscila típicamente entre 1 y 2, permitiendo ajustar la ecuación para que se adapte mejor al comportamiento real de los diodos (Universidad Nacional de Quilmes, 2015).

$$ID = I_s(e^{\frac{VD}{V_T}} - 1) \quad (1)$$

Donde VD es la tensión del diodo y:

$$V_T = \frac{\eta kT}{q} \quad (2)$$

En la ecuación (2) V_T es la tensión térmica y los términos de las ecuaciones anteriores se definen como:

I_s es la corriente de saturación inversa del diodo [A]

q es la carga del electrón ($-1.60217646 \times 10^{-19}$) [C]

η es el factor de idealidad del diodo

k es la constante de Boltzmann ($-1.380653 \times 10^{-23}$) [J/K]

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

T es la temperatura (expresada en Kelvin)

La temperatura de las celdas puede ser estimada con la ecuación (3) a partir de la temperatura ambiente T_a y la irradiancia G , donde $TNOCT$ representa la temperatura de operación de la celda, los valores de temperatura mencionados anteriormente se expresan en grados Kelvin (Arenas, M, Bastidas, & Ramos-paja, 2022).

$$T_{celdas} = T_a + G \left(\frac{TNOCT - (20 + 273.15)}{800} \right) \quad (3)$$

El modelo del diodo simple se emplea para representar de manera básica el comportamiento de un módulo fotovoltaico, se fundamenta en la previamente mencionada ecuación de Shockley, más, sin embargo, en su forma simplificada suponiendo condiciones ideales. Aunque presenta ciertas limitaciones en situaciones de baja irradiancia, el modelo de diodo simple (SDM) es utilizado en la literatura para la simulación de generadores fotovoltaicos basados en silicio cristalino (Petrone, Ramos-Paja, & Spagnuolo, 2017).

Este modelo omite considerar la corriente de recombinación y dependiendo del nivel de precisión requerido en la simulación, es posible simplificar aún más el SDM. En la literatura, se encuentra comúnmente una representación sin pérdidas, donde tanto la resistencia en serie como la resistencia en derivación son despreciadas; la primera se establece en cero y la segunda en infinito.

$$I_{pv} = I_{ph} - ID = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv}}{V_T}} - 1 \right] \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la celda fotovoltaica posee pérdidas por conexasión, se incluye un valor R_s que las representa.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_T}} - 1 \right] \quad (5)$$

Finalmente, para lograr una mayor precisión y representación del comportamiento real del módulo en el modelo del diodo simple, se vuelve necesario incluir un parámetro R_h que representa las pérdidas causadas por la corriente de fuga. La ecuación (6) muestra el modelo simplificado y utilizado del SDM.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_T}} - 1 \right] - \left[\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_h} \right] \quad (6)$$

Donde:

I_{pv} Corriente del módulo [A]

I_{ph} Corriente fotoinducida fotovoltaica [A]

V_{pv} Tensión del módulo [V]

R_s Resistencia en serie [Ω]

R_h Resistencia Shunt [Ω]

El parámetro I_{ph} puede ser calculado usando la ecuación (7), donde F_s es el factor de sombreado, G_{STC} e I_{phSTC} corresponden a la irradiancia y la I_{ph} en condiciones de prueba estándar respectivamente, α_{ISC} es el coeficiente térmico de la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico obtenido de las especificaciones técnicas del panel (Arenas, M, Bastidas, & Ramos-paja, 2022).

$$I_{ph} = F_s \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot (I_{phSTC} + \alpha_{ISC}(T - T_{STC})) \quad (7)$$

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Es importante mencionar que I_{ph} puede suponerse aproximadamente igual a la corriente de corto circuito I_{sc} (Murga, R. 2019). De esta manera una estimación válida es:

$$I_{ph} = FS \times I_{sc} \quad (8)$$

El modelo simplificado del diodo nos permite comprender la relación entre la corriente y la tensión (I-V) de cualquier fuente de energía fotovoltaica que funcione en condiciones homogéneas. Bajo la premisa de que todas las celdas son idénticas y están expuestas a las mismas condiciones ambientales, los parámetros (I_s , I_{ph} , η , R_s y R_h) pueden ser ajustados, aumentándolos o disminuyéndolos, teniendo en cuenta el número de celdas/paneles conectados en serie para formar un conjunto y el número de conjuntos conectados en paralelo. De esta forma es posible modelar el generador desde distintos niveles, celda, submódulo, módulo o configuraciones de varios paneles tan solo escalando sus parámetros. En estas condiciones, las tensiones se multiplican por N_s , que es el número de celdas conectadas en serie, y todas las corrientes se multiplican por N_p , que es el número de conjuntos conectados en paralelo. Como resultado, la resistencia en serie R_s y la resistencia en paralelo R_h aumenta en un factor de N_s y se dividen por un factor de N_p . Los parámetros SDM se ajustan de la siguiente manera (Petroni, Ramos-Paja, & Spagnuolo, Photovoltaic Sources Modeling, 2017):

$$I_{ph} = N_p * I_{ph,celda} \quad (9)$$

$$I_s = N_p * I_{s,celda} \quad (10)$$

$$\eta = \eta_{celda} \quad (11)$$

$$V_T = N_s * V_{T,celda} \quad (12)$$

$$R_s = \frac{N_s}{N_p} * R_{s,celda} \quad (13)$$

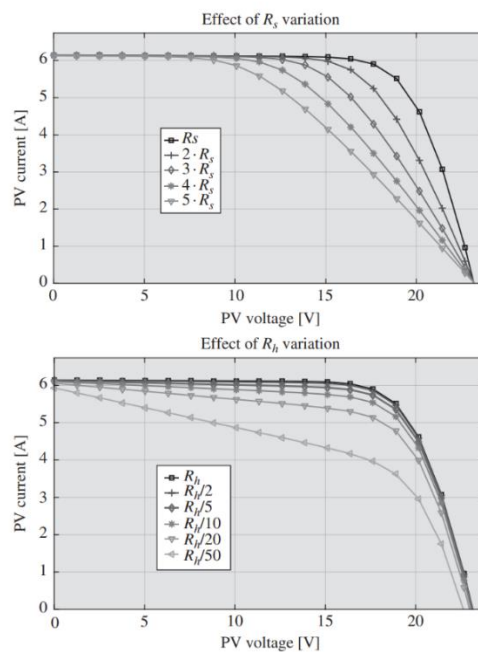
ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

$$R_h = \frac{N_s}{N_p} * R_{h,celda} \quad (14)$$

El ajuste de cualquiera de los componentes del conjunto de parámetros durante la simulación posibilita una reproducción más precisa del rendimiento de la fuente fotovoltaica, lo que conduce a una mejora notable en los resultados de la simulación. Esto resulta especialmente beneficioso en escenarios de simulación en los que las condiciones de operación varían entre las distintas células del conjunto fotovoltaico, o simplemente debido a las disparidades inherentes en dichas condiciones, como lo explica (Petrone, Ramos-Paja, & Spagnuolo, Photovoltaic Sources Modeling, 2017). Es importante modificar estos parámetros según las directrices proporcionadas en la Figura 3 y la Figura 4, para ajustar el modelo a condiciones reales, ya que inicialmente, los parámetros obtenidos corresponden a condiciones ideales, típicamente asociadas con módulos solares nuevos.

Figura 3

Modificación de la curva I-V debido a R_s y R_h

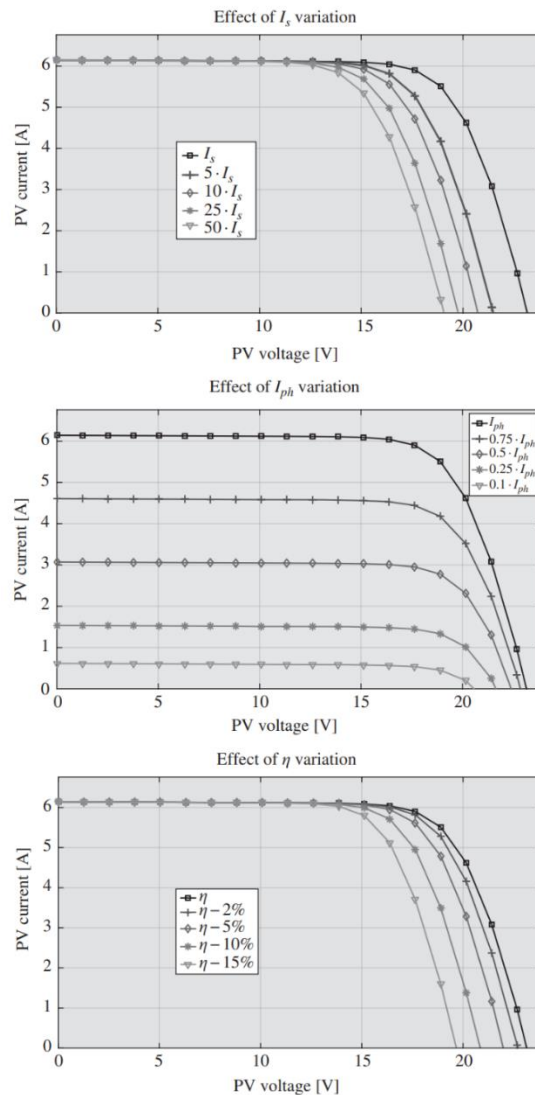


ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Nota: Esta figura muestra el efecto en la variación de los parámetros R_s y R_h sobre la curva I-V. Tomado de (Petrone, Ramos-Paja, & Spagnuolo, Photovoltaic Sources Modeling, 2017).

Figura 4

Modificación de la curva I-V debido a la variación en los parámetros de MDS



Nota: Esta figura muestra el efecto en la variación de los parámetros n , R_s , R_h sobre la curva I-V.

Tomado de (Petrone, Ramos-Paja, & Spagnuolo, Photovoltaic Sources Modeling, 2017).

2. Metodología experimental

2.1 Elementos utilizados

Para llevar a cabo la fase experimental, se realizaron las mediciones de corriente y tensión en un panel solar ubicado en la terraza del edificio de Energías Renovables de la sede de la Universidad Industrial de Santander en Piedecuesta. Para esto, se requirió la utilización de diversos elementos y dispositivos que contribuyeron al cumplimiento del objetivo. A continuación, se presenta una lista de los elementos más relevantes utilizados en esta investigación, sus manuales y especificaciones técnicas pueden ser encontradas en el Apéndice A.

2.1.1 Panel solar

Se utiliza el panel Upsolar UP-M250P (ver Figura 5) con una potencia máxima de 250 W y una eficiencia pico del 15.37%. Cuenta con 60 células y una clasificación de potencia PTC de 222,3 vatios. Este panel utiliza tecnología de silicio policristalino y presenta una tolerancia de potencia del 0% al +3%. Con una tensión máxima del sistema de 1000V, es adecuado para una variedad de aplicaciones fotovoltaicas. Con un peso de 18,5 kg, sus dimensiones son 1.640 mm de largo, 992 mm de ancho y 35 mm de profundidad, con cables de salida de 1.000 mm de largo y una conexión multicontacto de tipo 4 (ENF Solar, 2023).

Figura 5

Panel Upsolar UP-M250P



Nota. Esta figura muestra el panel utilizado en la realización de las medidas de este proyecto de grado. Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

2.1.2 Banco de reóstatos

Se utilizaron 3 reóstatos Cenco 44 Ω (ver Figura 6), los cuales son dispositivos de control de corriente utilizados para ajustar la cantidad de corriente que fluye a través del circuito. Cuentan con una capacidad máxima de 3.1 amperios, los cuales al ser conectados en paralelo permiten una corriente máxima del panel de 9.3 amperios.

Figura 6

Reóstato Cenco



Nota. Esta figura muestra los tres reóstatos utilizados para la variación de corriente y tensión del sistema. Elaboración propia.

2.1.3 Multímetro

Se utilizó el Multímetro Digital Fluke 179 (ver Figura 7), una herramienta que ofrece una alta precisión en la medición de tensión de corriente continua (CC) con una variación de $\pm(0.09\% + 2)$ y un rango máximo de 1000 V, así como corriente de CC con una precisión de $\pm(1.0\% + 3)$ y un rango máximo de 10 A.

Figura 7

Multímetro digital Fluke 179

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF



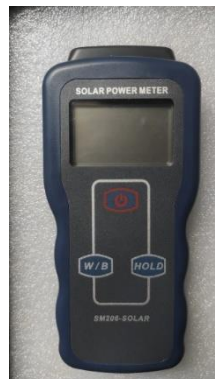
Nota. Esta figura muestra el multímetro utilizado en la medición. Elaboración Propia

2.1.4 Piranómetro

El piranómetro SM206 (ver Figura 8), es un instrumento de medición diseñado para medir la radiación solar incidente en una unidad de superficie (W/m^2), ofrece un rango de medición amplio y preciso, con capacidades de medición de radiación solar que van desde 0.1 hasta 399.9 W/m^2 o 1 hasta 3999 W/m^2 . Cumple con los estándares de calibración exigidos por instituciones de metrología, como el CENAM en México o el INM en Colombia, lo que garantiza mediciones precisas y confiables.

Figura 8

Piranómetro SM206



Nota. Esta figura muestra el piranómetro SM206 utilizado en la medición. Elaboración Propia

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

2.1.5 Termómetro

Se utilizó el termómetro Fluke 568 (ver Figura 9), el cual tiene un amplio rango de temperaturas infrarrojas de -40 °C a 800 °C (-40 °F a 1472 °F) y procura mediciones con un margen de error bajo que varía según la temperatura, manteniendo un alto nivel de confiabilidad en diversas condiciones.

Figura 9

Termómetro Fluke 568



Nota. Esta figura muestra el termómetro utilizado en la medición. Elaboración Propia

2.1.6 Dispositivo de medición PowerCheck

Se realizan las mediciones de corriente y tensión a través de un PWRcheck (ver Figura 10), un instrumento de medición de potencia para tensiones de CC, diseñado para conectar entre la fuente y la carga utilizando conectores PowerPoles® Anderson (Powerwerx, 2023). Este dispositivo mide tensión, corriente, potencia y amperios/hora en un rango de 0 a 60V CC y hasta 40A de carga continua, con una precisión de $\pm 10\text{mV}$ y $\pm 10\text{mA}$. Ofrece opciones de visualización en pantalla y puede almacenar hasta 174,000 valores medidos y su interfaz USB permite la lectura de datos y la configuración de alarmas mediante el software para Windows PWRcheck (West Mountain Radio, 2023). El PWRcheck puede ser alimentado por la fuente medida o por USB, con un consumo propio de 60-120mA.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 10

PWRcheck



Nota. Esta figura muestra el PWRcheck utilizado para medir la tensión y corriente de la carga.

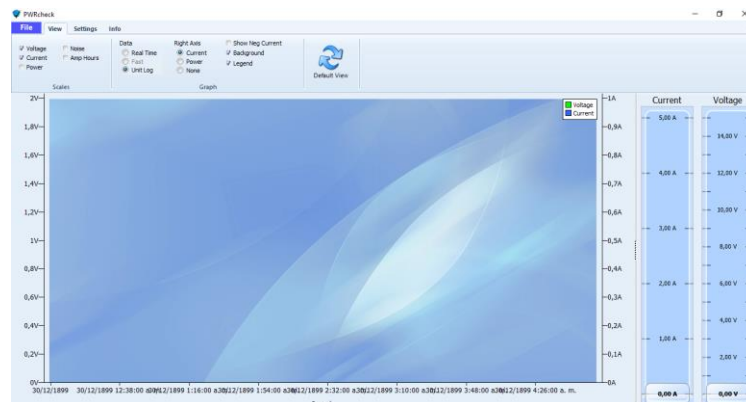
Elaboración Propia

2.1.7 Software PWRcheck

Utilizado para la adquisición y procesamiento de los datos almacenados por el PWRcheck, es de uso libre y permite el análisis de los datos recogidos por el dispositivo además de exportación de los datos a otros formatos. La interfaz del software se muestra en la Figura 11 y Figura 12.

Figura 11

Interfaz software PWRcheck



Nota. Esta figura muestra la interfaz inicial del software PWRcheck utilizado en la adquisición de datos tomados por el instrumento. Elaboración Propia

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

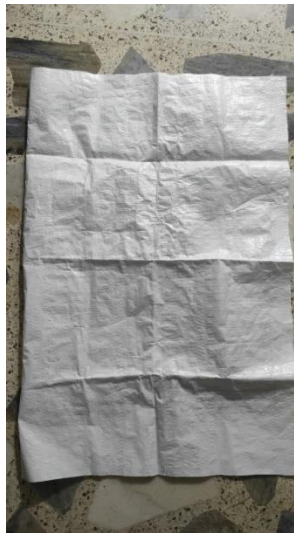
2.1.8 Elemento de sombreado

2.1.8.1 Tejido de polipropileno

Se escogió este material (ver Figura 12), que disminuye la irradiancia en aproximadamente $500 \frac{W}{m^2}$ a irradiancias mayores a $1000 \frac{W}{m^2}$

Figura 12

Tejido de polipropileno



Nota. Esta figura muestra el material utilizado para sombrear parte del panel. Se busca un material que deje pasar cierto porcentaje de irradiancia para medir el impacto de la disminución en cada submódulo. Elaboración Propia

2.1.8.2 Polietileno

Se escogió este material (ver Figura 13) que disminuye la irradiancia en aproximadamente $300 \frac{W}{m^2}$ a irradiancias mayores a $1000 \frac{W}{m^2}$.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 13

Bolsa de polietileno



Nota. Esta figura muestra el material utilizado para sombrear parte del panel. Se busca un material que deje pasar cierto porcentaje de irradiancia mayor que el anterior para medir el impacto de la disminución en cada submódulo. Elaboración Propia

2.1.8.3 Parasol

Se escogió este material (ver Figura 14) ya que reduce a $0 \frac{W}{m^2}$ la irradiancia recibida en el panel.

Figura 14

Parasol



ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

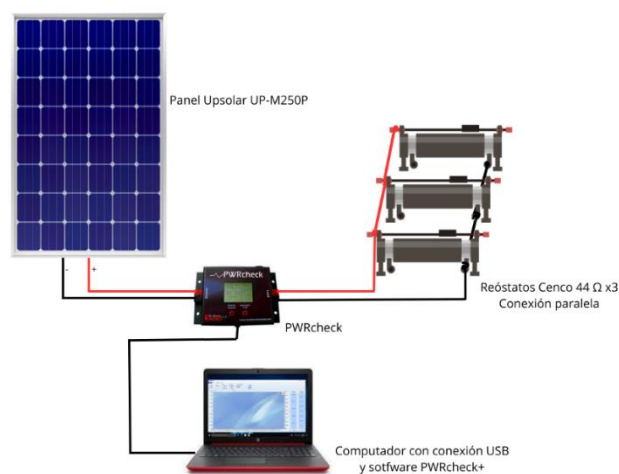
Nota. Esta figura muestra el material utilizado en 3.2 Sombreado parcial por celdas por submódulo para obtener sombras con irradiancia nula en el panel. Elaboración Propia

2.2 Conexión

Una vez obtenidos los elementos mencionados anteriormente, se procederá a realizar el montaje correspondiente (Ver Figura 15). Este montaje implica la conexión de los reóstatos en paralelo para un soporte de corriente máxima de 9.3 amperios. Estos reóstatos se conectarán al lado de carga (LOAD) del dispositivo Power Check, mientras que en el lado de fuente (SOURCE) se conectará el panel solar con la polaridad correspondiente. Finalmente, se establecerá la conexión a través de un cable micro USB tipo B-USB desde el puerto de adquisición de datos del Power Check hacia el ordenador que cuente con el software PWRcheck.

Figura 15

Diagrama representativo de la conexión realizada



ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Nota. Esta figura muestra la representación de los elementos y la forma en la que se deben conectar los equipos. Elaboración Propia

3. Metodología de muestreo

Una vez realizada la conexión y bajo condiciones ambientales óptimas (una zona despejada de nubes para mantener una irradiancia lo más constante posible), se procede a realizar la medición: inicialmente se toma el registro de irradiancia y temperatura del panel, se coloca el banco de reóstatos en su resistencia mínima con el propósito de obtener los valores de corriente en condiciones de corto circuito. Luego, de forma manual, se incrementa la resistencia de manera constante hasta alcanzar su valor máximo, donde se establecen las condiciones de circuito abierto. Una vez que los datos se han registrado en el software, se procede a exportarlos en formato .xlsx y posteriormente, estos datos son sometidos a un proceso de análisis y reducción, con el objetivo de obtener 100 puntos representativos. Estas mediciones son realizados y repetidas bajo las siguientes condiciones:

3.1 Sin sombra

La primera medición que se llevará a cabo se realizará bajo condiciones cercanas a las ideales, es decir, sin que ninguna sombra afecte a ningún submódulo ni celda del panel (ver Figura 16 y Figura 17). En la Figura 18 y Figura 19 se puede observar el comportamiento de las curvas I-V y P-V respectivamente bajo estas condiciones.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 16

Representación panel sin sombra



Nota. Esta figura muestra cómo debería estar el panel para realizar la medición sin sombra.

Elaboración Propia

Figura 17

Panel utilizado

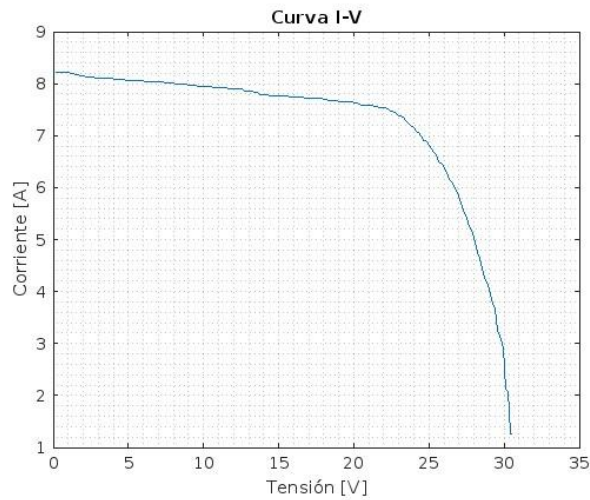


Nota. Esta figura muestra el panel solar utilizado en las mediciones sin sombra. Elaboración Propia

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 18

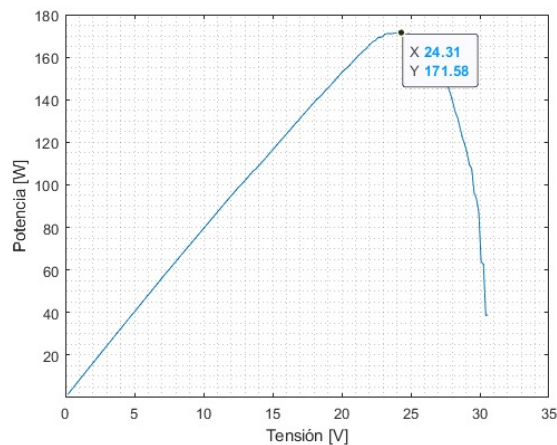
Curva I-V del panel sin sombra



Nota. Esta figura muestra la curva de corriente-tensión para el panel sin sombra a una temperatura del panel de 49°C e irradiancia $1071 \frac{W}{m^2}$. Elaboración Propia

Figura 19

Curva P-V del panel sin sombra



Nota. Esta figura muestra la curva de potencia-tensión para el panel sin sombra a una temperatura del panel de 49°C e irradiancia $1071 \frac{W}{m^2}$, donde la potencia máxima se da a 24.31 V con 171.58

W. Elaboración Propia

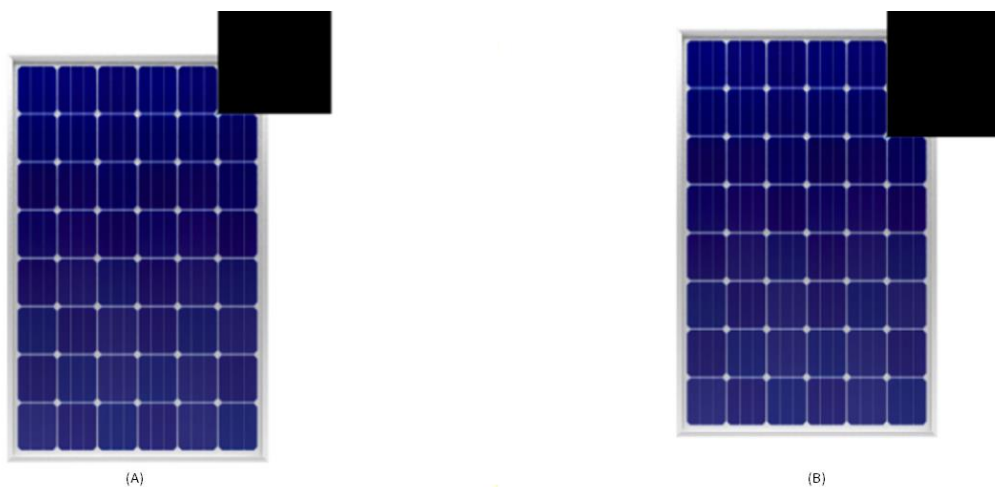
3.2 Sombreado parcial por celdas por submódulo

Esta medición se lleva a cabo con el propósito de comprobar experimentalmente la conexión en serie entre las celdas dentro del mismo submódulo. Se procede a sombrear una a una cada celda de cada submódulo (ver Figura 20, Figura 21 y Figura 22), observando que, en caso de que una celda se desconectara completamente (es decir, quedara en sombra total con irradiancia igual a 0), se desconectaría todo el submódulo. Se realiza con un elemento por el que no se filtre nada de luz o irradiancia. A continuación, se muestran 2 resultados de las mediciones realizadas, las demás mediciones realizadas se aprecian en el Apéndice B.

Para comprobar que estas dos celdas están en serie, la curva I-V y por consiguiente la curva P-V de cada una deben ser muy similares. Esto se puede comprobar con la Figura 23 y Figura 24.

Figura 20

Representación Panel con sombra en celdas de la misma columna



Nota. En A se ve la representación de la primera prueba donde se sombrear una celda de un submódulo. B representa el panel para la prueba posterior donde se sombrear otro de las celdas.

Elaboración Propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 21

Panel con parasol en una celda



Nota. Esta figura muestra el panel con una celda sombreada. Elaboración Propia.

Figura 22

Panel con parasol en dos celdas

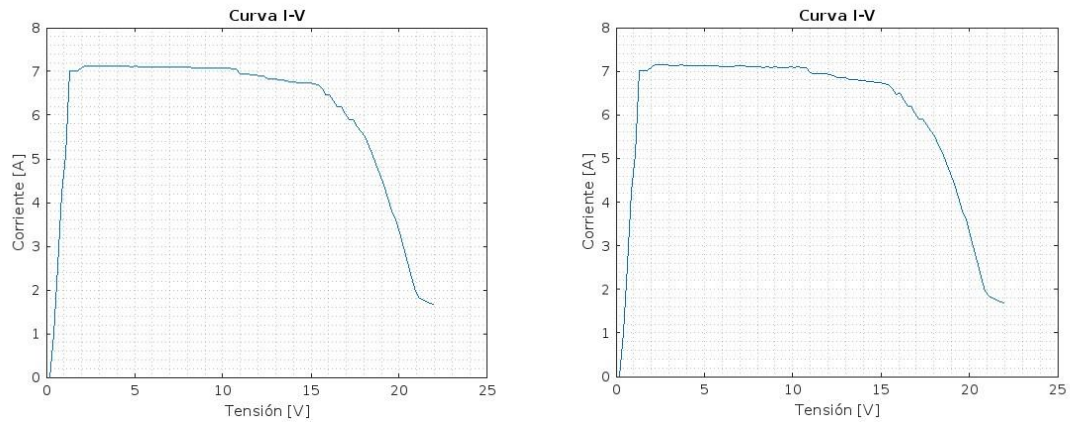


Nota. Esta figura muestra el panel con dos celdas sombreadas. Elaboración Propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 23

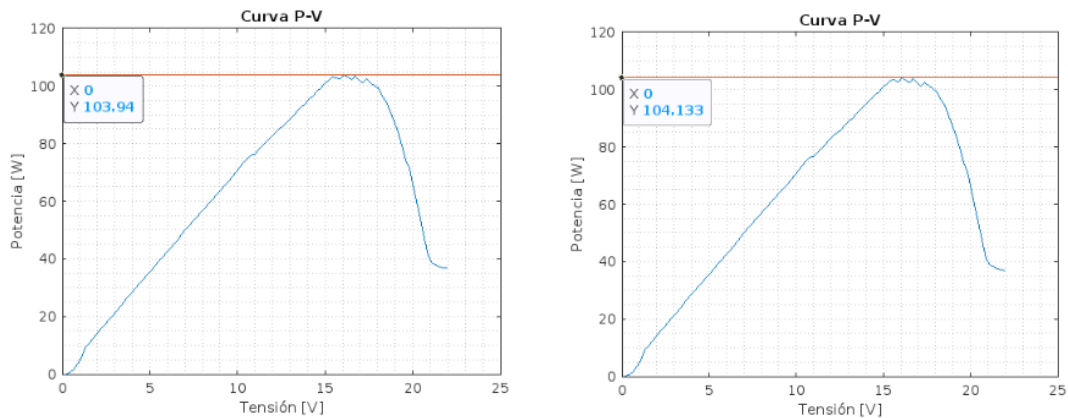
Comparación de curvas I-V con una y dos celdas sombreadas de un mismo submódulo



Nota. Se pueden observar las curvas I-V bajo condiciones de una y dos celdas sombreadas respectivamente a una temperatura del panel de 50.4°C e irradiancia $1070 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Elaboración Propia.

Figura 24

Comparación de curvas P-V con una y dos celdas sombreadas de un mismo submódulo.



Nota. Se pueden observar las curvas P-V bajo condiciones de una y dos celdas sombreadas, donde las potencias pico disminuyen con respecto a la prueba sin sombra un 39.4% y 39.3% respectivamente. Elaboración Propia.

3.3 Sombreado parcial por submódulo

En esta medición, se procedió a sombrear de forma individual cada submódulo, con el objetivo de demostrar las conexiones en serie que existen entre las columnas 1-2, 3-4 y 5-6 del panel, como se ilustra en la Figura 25. Es importante destacar que, si uno de los submódulos asociados se desconecta, la tensión de su par será el mismo. Se mostrará la conexión entre las columnas 5 y 6 (ver Figura 26 y Figura 27) donde el funcionamiento de una depende de la otra, si se sombrea una de estas tendrá el mismo comportamiento de cuando se somborean las 2, esto se puede comprobar en la Figura 28 y en la Figura 29.

Figura 25

Numeración columnas panel



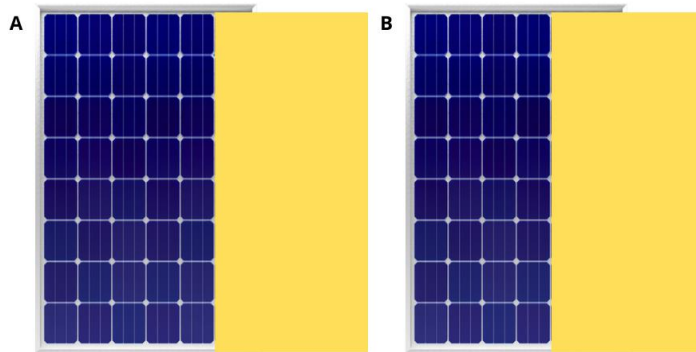
Nota. Se pueden observar la numeración de las columnas de los submódulos del panel solar.

Elaboración Propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 26

Representación Panel con sombra en columnas del mismo submódulo



Nota. Se pueden observar la numeración de las columnas de los submódulos del panel solar.

Elaboración Propia.

Figura 27

Panel con columna de celdas sombreada



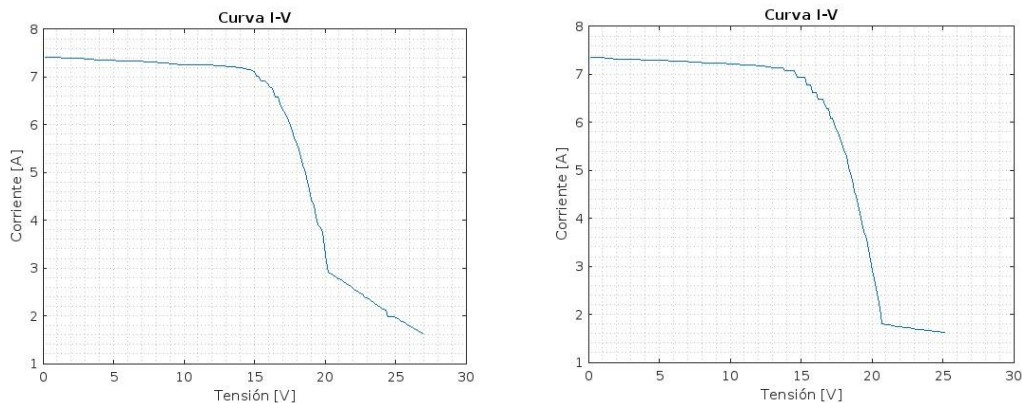
Nota. Se pueden el panel solar con una de las columnas de un submódulo sombreada. Elaboración

Propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 28

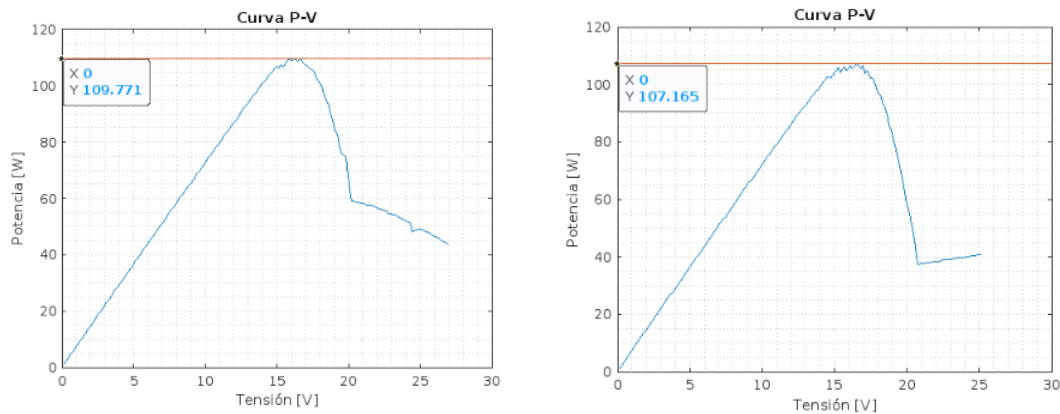
Comparación de curvas I-V con una y dos columnas de un submódulo sombreadas



Nota. Se pueden observar las curvas I-V a una temperatura del panel de 52.2°C e irradiancia $1075 \frac{W}{m^2}$ bajo condiciones de una y dos columnas sombreadas, respectivamente. Elaboración Propia.

Figura 29

Comparación de curvas P-V con una y dos columnas de un submódulo sombreadas



Nota. Se pueden observar las curvas P-V bajo condiciones de una y dos columnas sombreadas, donde la potencia pico disminuyen con respecto a la prueba sin sombra un 36% y 37.54% respectivamente. Elaboración Propia.

3.4 Sombreado parcial de los submódulos bajo distintas condiciones

Se procedió a sombrear dos submódulos utilizando elementos de distinta opacidad (ver Figura 30) con el propósito de observar los efectos provocados por cada uno de ellos. De esta manera, se pudo evaluar cómo las sombras generadas por elementos con distintos niveles de opacidad afectan el rendimiento de los submódulos, esto se evidencia en las curvas I-V y P-V de la Figura 31 y la Figura 32.

Figura 30

Representación sombreado de submódulos con distinta sombra

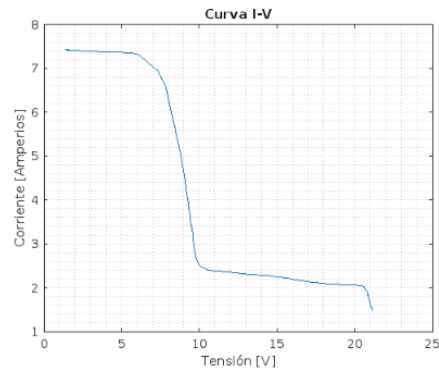


Nota. Se puede observar cómo debería sombreadarse el panel con dos tipos de sombra, en este caso polietileno (verde) y polipropileno (amarillo). Elaboración Propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Figura 31

Curva I-V con panel bajo condiciones distintas de sombreado

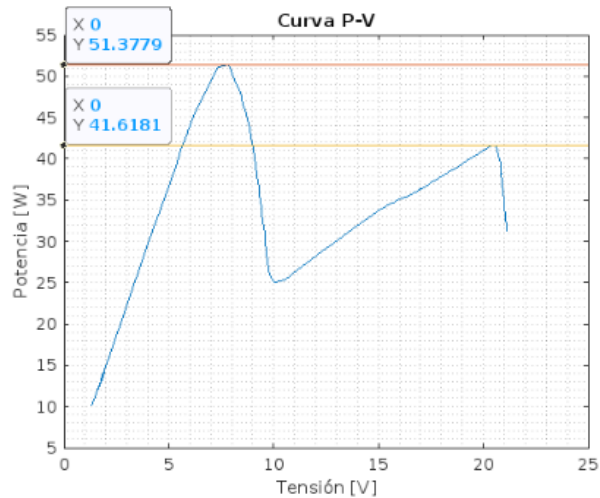


Nota. Se pueden observar la curva I-V a una temperatura del panel de 47.3°C e irradiancia 1094

$\frac{W}{m^2}$ bajo condiciones distintas de sombreado. Elaboración Propia.

Figura 32

Curva P-V condiciones distintas de sombreado



Nota. Se puede observar la curva P-V bajo condiciones distintas de sombreado, donde la potencia pico inicial disminuye un 70% y el segundo pico 75.75% con respecto a la medición sin sombra.

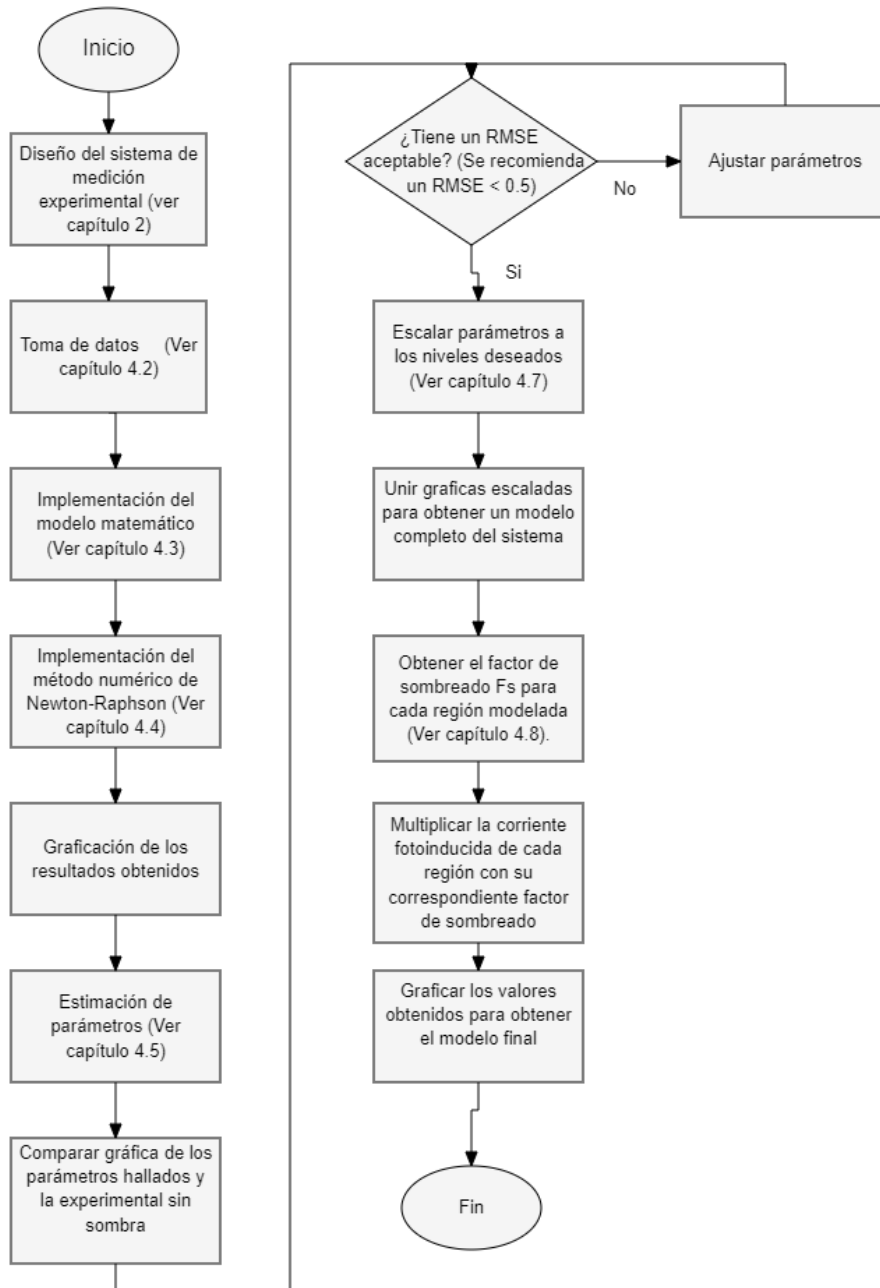
Elaboración Propia.

4. Metodología para la estimación del factor de sombreado en el Modelo del diodo simple en paneles fotovoltaicos

En este capítulo se presenta una metodología (Ver Figura 33) para la estimación del factor de sombreado, un componente esencial en la modelización y comprensión del comportamiento de los paneles fotovoltaicos (FV) en diversas condiciones ambientales y de sombreado. La precisión en la estimación de este factor es crucial para el diseño y la optimización de sistemas fotovoltaicos. La metodología se divide en siete pasos fundamentales que abarcan desde el diseño del sistema de medición experimental hasta la implementación del modelo matemático y la estimación de parámetros.

Figura 33

Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Nota: Esta figura muestra el diagrama de flujo que describe el proceso para la estimación del factor de sombreado a partir de la toma de medidas experimentales y modelado matemático.

Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

4.1 Diseño del Sistema de medición experimental

El primer paso se enfoca en la creación de un sistema de medición experimental con buena precisión, fundamental para la toma de datos confiables. Se seleccionan cuidadosamente los componentes, incluyendo un panel solar, una carga resistiva variable y un datalogger de alta precisión para registrar tanto la tensión (V) como la corriente (I). Se da preferencia a una carga electrónica programable para obtener curvas I-V suaves y precisas, pero de no disponer de una se puede emplear una de otro tipo como por ejemplo bancos de reóstatos. Además, se asegura que la carga pueda soportar las condiciones extremas, como la corriente de corto circuito máxima del panel y su tensión de circuito abierto. Un computador con software adecuado se utiliza para el control de la carga o la exportación de datos. Se incorporan dispositivos para medir variables ambientales, como la temperatura y la irradiancia solar. Una cámara termográfica o un termómetro se emplean para registrar la temperatura de las celdas o en su defecto la temperatura ambiente y estimar la temperatura de las celdas del panel con esta, como en la ecuación (3). Un piranómetro o sensor de irradiancia, mide la irradiancia solar incidente que influye sobre el módulo en el momento de la prueba. Teniendo todos los elementos necesarios descritos anteriormente se procede a realizar el conexionado como se mostró en el capítulo 2 y se continua con el segundo. Las referencias de los equipos utilizados en este trabajo y su conexionado se presentan en las secciones 2.1 Elementos utilizados y 2.2 Conexión respectivamente.

4.2 Toma de datos

El segundo paso consiste en la toma de datos, que incluye la obtención de curvas I-V en una variedad de condiciones. Para todas las curvas se registran datos en todo el rango de carga, desde corto circuito hasta circuito abierto, utilizando la carga resistiva variable. Un paso adicional en este punto es verificar el efecto de los diodos bypass, para ello se sombrea celda por celda del

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

mismo submódulo con el fin de corroborar que el submódulo entero se comporta acorde a las condiciones de la celda con menor irradiancia. Una vez comprobado el efecto anterior, se toman los datos de todas las curvas bajo condiciones lo más similares posibles de temperatura e irradiancia, esta vez implementando diferentes casos de sombreado, estos pueden ser entre otros, un caso sin sombra alguna, donde el panel este expuesto completa y plenamente al sol, otro caso sombreado un submódulo completamente con irradiancia aproximadamente nula y posteriormente con diferentes sombreados parciales, es decir, usando diversos elementos que disminuyan la irradiancia incidente en estas celdas, por ejemplo plásticos traslucidos o algunos tipos de polarizado, otro caso aplicando los mismos escenarios anteriores pero esta vez para dos submódulos al tiempo y otro caso aplicando sombreados parciales a cada submódulo independientemente para generar en cada uno unas condiciones de irradiancia distintas. Esto se hace con el fin de validar la metodología en términos generales, pero si se desea modelar un solo caso específico solo será necesario medir esa condición puntualmente. Los casos anteriormente descritos realizados en este trabajo se detallan en el capítulo 3.

4.3 Implementación del modelo matemático

El tercer paso consiste en la implementación el modelo matemático del diodo simple en un entorno de programación, para este caso se realizó específicamente en MATLAB y el código se evidencia en el Apéndice C. Se ingresan los valores constantes, como la carga de un electrón q , la Temperatura Nominal de Operación de Celda **TNOCT** expresada en grados kelvin y la constante de Boltzmann k , posteriormente los valores variables, como la irradiancia solar G en W/m^2 y la temperatura ambiente Ta expresada también en grados Kelvin. Además, se estima la temperatura de la celda T en función de Ta y G .

4.4 Implementación del método numérico de Newton-Raphson

En el cuarto paso se introducen los parámetros inicialmente desconocidos del modelo SDM, I_s , I_{ph} , n , R_s y R_h y a través de ciclos “for” en MATLAB, se aplica el método numérico de Newton-Raphson el cual ha sido probado por algunos autores como (Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, Analytical model of mismatched photovoltaic fields by means of Lambert Wfunction, 2007) y ha demostrado ser eficaz para solucionar este tipo de ecuaciones, este método numérico trabaja principalmente con la ecuación (6) y su respectiva derivada, se obtiene así un par de vectores de tensión y corriente, que luego se utilizaran para graficar la curva I-V.

4.5 Estimación de parámetros

Para el quinto paso se requiere dar valores a los parámetros inicialmente desconocidos. Se emplea un método simplificado de estimación de cinco parámetros para el modelo de diodo único de paneles fotovoltaicos (Stornelli, Mutillo, Rubeis, & Nardi, 2019). Este método se basa en una iteración de dos etapas para encontrar dichos factores, se lleva a cabo en primer lugar usando únicamente el modelo R_s y se ignora la presencia de R_h ; posteriormente haciendo uso de las condiciones de cortocircuito y circuito abierto se obtienen las ecuaciones para calcular I_s e I_{ph} . Como resultado, la primera etapa trabaja con iteraciones para ajustar el valor de n y calcular con base a este los demás parámetros. Para la segunda etapa, la variante iterativa en el proceso es R_h , se calcula su valor inicial usando las variables encontradas en el primer paso y luego se ajusta iterativamente en conjunto con los demás parámetros que dependan de R_h . Se implementa el algoritmo mencionado anteriormente en MATLAB utilizando las ecuaciones correspondientes. El código implementado para esta estimación se encuentra en la lista de apéndices. Para este trabajo los valores ingresados inicialmente se presentan en la Tabla 1.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Tabla 1

Valores iniciales para la estimación de los parámetros SDM

Isc	8.5
Voc	38
Imp	8.17
Vmp	30.6
Ns	60
Pmax	250.002
N	1
G	1080
TNOCT	318.15
Ta	300.15
T	333.9
VT	1.7279
Iteraciones (iter)	10000
Tolerancia step1 (tol)	0.01
Tolerancia step2 (tolI)	0.001

Nota: Esta tabla muestra los valores iniciales que se tomaron para el modelamiento del SDM

Elaboración propia.

Los valores iniciales obtenidos para los parámetros después del método de estimación empleado se muestran en la Tabla 2.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Tabla 2

Valores obtenidos para los parámetros SDM

η	0.9
I_s	2.069495×10^{-10}
I_{ph}	8.502
R_s	0.328047
R_h	1185.126522

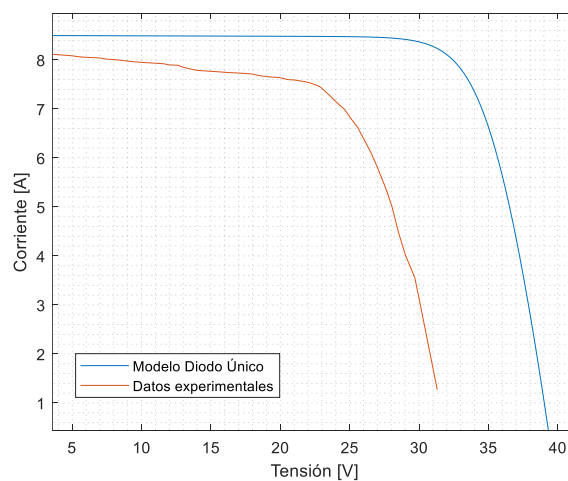
Nota: Esta tabla muestra los valores obtenidos para los parámetros SDM. Elaboración propia.

4.6 Ajuste de parámetros

Los valores obtenidos a través del método simplificado de estimación se incorporan al código del modelo SDM para graficar la primer curva modelo, en la Figura 34 se evidencian las diferencias entre la curva modelada con los parámetros iniciales y la curva experimental sin sombra para el caso de estudio.

Figura 34

Curvas I-V experimental vs teórica sin ajustar



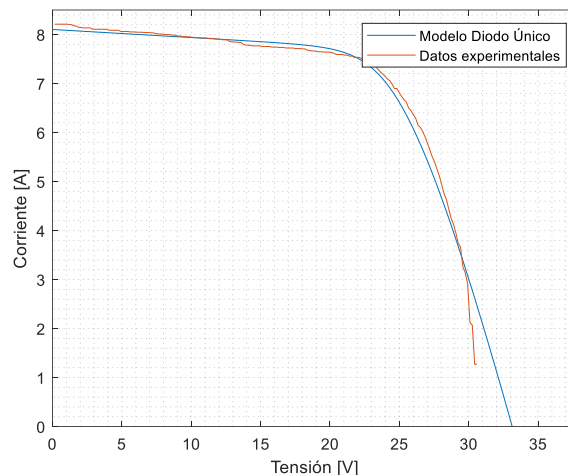
ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Nota: Esta figura muestra la comparación entre las curvas I-V sin sombra, experimental y teórica tomada con la estimación inicial de parámetros. Elaboración propia.

Luego, se realizan ajustes visuales en los cinco parámetros para lograr la mejor coincidencia posible entre las curvas teóricas y experimentales. Esto se hace siguiendo las directrices explicadas en el capítulo 1, donde se evidencia gráficamente la afectación de la curva I-V debido a la modificación de cada uno de estos parámetros de SDM y teniendo en cuenta que los valores estimados inicialmente representaban condiciones ideales, mientras que el panel solar utilizado tiene un deterioro causado por el tiempo y factores externos. En la Figura 35 se evidencia la curva con los parámetros ajustados para una mejor representación de la curva experimental. El valor RMSE calculado entre ambas graficas fue de 0.2005. Los valores finales ajustados de los parámetros con los cuales se trabajó el modelo se muestran en la Tabla 3.

Figura 35

Curvas I-V experimental vs teórica ajustada



Nota: Esta figura muestra la comparación entre las curvas I-V sin sombra, experimental y teórica tomada con los parámetros ajustados. Elaboración propia.

Tabla 3*Valores de los parámetros SDM ajustados*

n	0.84
Is	2.9×10^{-9}
Iph	8.35
Rs	0.8
Rh	60
RMSE	0.2005

Nota: Esta tabla muestra los valores de los parámetros una vez fueron ajustados con el método mencionado anteriormente. Elaboración propia.

4.7 Consideraciones escalables

Es importante mencionar que algunos parámetros son escalables en función de la configuración y el número de celdas conectadas en serie y en paralelo que se deseen modelar. Inicialmente, los parámetros se calculan teniendo en cuenta el generador completo, para este caso es de 60 celdas en serie, pero para el análisis a nivel de submódulo, no se multiplica el valor de V_T por 60 sino que se aplica un factor multiplicador de 20, que es el número de celdas en serie por submódulo del panel utilizado y se multiplican los valores de R_s y R_h por un factor de 20/60 que corresponde a la relación entre el número de celdas en serie sobre el número de celdas con las que se calcularon y ajustaron los parámetros del paso 6, manteniendo las corrientes iguales, ya que no hay celdas conectadas en paralelo. Lo anterior obedece a los estándares descritos en las ecuaciones (9),(10),(11),(12),(13) y (14) del capítulo 1, teniendo en cuenta que para casos con celdas conectadas en paralelo se deben considerar las consideraciones allí planteadas. De esta forma para modelar el comportamiento del panel completo se debe realizar una gráfica independiente por cada

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

sección con condiciones diferentes de sombreado y luego superponer las gráficas resultantes. A continuación, se presentan las comparaciones entre las curvas I-V experimentales y las del modelo aplicando el FS para 3 casos distintos de sombreado.

4.8 Identificación e incorporación del FS al modelo

Finalmente, como se ha explicado antes, para modelar un generador fotovoltaico bajo distintos factores de sombreado, es necesario modelar cada zona que está siendo afectada por condiciones diferentes, para esto, la corriente I_{ph} del modelo de cada zona escalada en el paso anterior debe ser modificada por un Factor de sombreado FS . este es un parámetro que varía entre 0 y 1 y permite modelar la influencia del sombreado en la producción de energía de un panel solar. Este factor se identifica en este trabajo como la relación entre un valor aproximadamente en el punto medio de la rodilla a modelar de la curva I-V y el valor más alto de corriente registrado en las pruebas en situación de corto circuito I_{sc} de la rodilla anterior en la curva del panel solar.

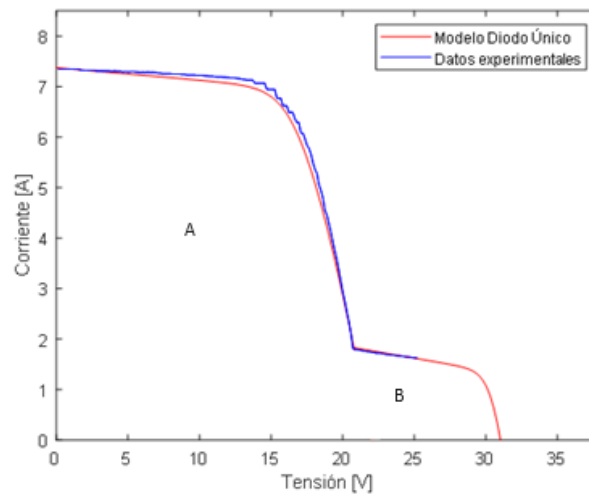
En otros términos, FS representa cuanto de la corriente generada por el submódulo del panel en la región sombreada se asemeja a la corriente de cortocircuito en la primera rodilla de la curva I-V. Un valor de FS igual a 1 indicaría que la corriente generada en la zona sombreada es idéntica a la corriente de cortocircuito de la zona con más irradiancia, lo que significa que el sombreado no afecta la generación de energía en absoluto en comparación a la primera región del módulo. Por otro lado, un valor de FS igual a 0 implicaría que la zona sombreada no contribuye a la generación de energía. Por lo tanto, al utilizar el factor de sombreado en el modelado, estamos considerando que la zona sombreada se asemeja en cierta medida a una parte específica de la curva I-V del panel solar. Esto nos permite modelar con precisión el impacto del sombreado en la producción de energía y ajustar nuestra estimación de generación en consecuencia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

A continuación, se presentan imágenes de tres casos realizados como parte de la verificación de la metodología propuesta (ver Figura 36, Figura 37 y Figura 38), donde se comparan las curvas I-V experimentales con las curvas modeladas utilizando el factor de sombreado correspondiente. Además, se muestran los valores específicos, tanto para F_s como para los demás parámetros que se utilizaron en cada uno y el valor RMSE calculado entre las dos curvas (ver Tabla 4, Tabla 5, y Tabla 6).

Figura 36

Curva I-V con sombreado parcial en 1 submódulo



Nota: Esta figura muestra la comparación entre las curvas I-V con sombreado parcial en un submódulo, experimental y teórica tomada con los parámetros ajustados. Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Tabla 4

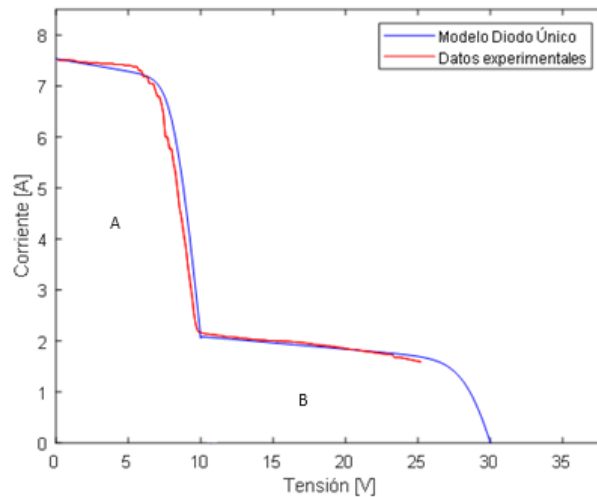
Parámetros para la curva I-V con 1 submódulo sombreado parcialmente

Parámetro	Rodilla A	Rodilla B
Celdas en serie N_s	40	20
F_s	7.346/8.21	1.63/7.346
I_{pv}	0.2219	7.4713
V_T	0.4882	0.9763
R_s	0.2667	0.5333
R_h	20	40
RMSE	0.1270	

Nota: Esta tabla muestra la comparación de la rodilla A y B, 1 submódulo. Elaboración propia.

Figura 37

Curva I-V con igual sombreado parcial en 2 submódulos



Nota: Esta figura muestra la comparación entre las curvas I-V con sombreado parcial en dos submódulos, experimental y teórica tomada con los parámetros ajustados. Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Tabla 5

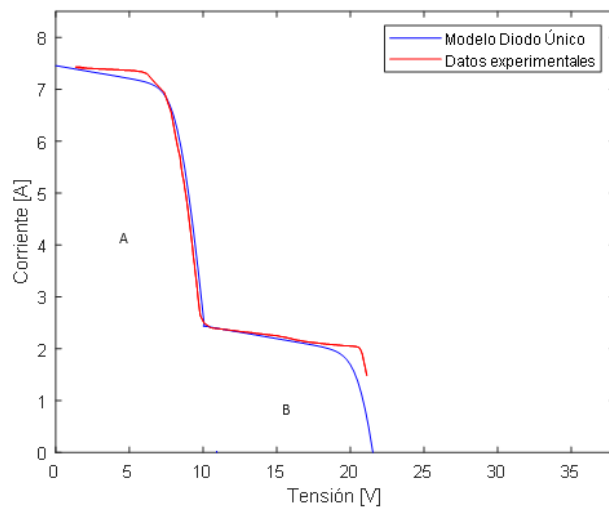
Parámetros curva I-V con 2 submódulos con igual sombreado parcial

Parámetro	Rodilla A	Rodilla B
Celdas en serie Ns	20	40
Fs	7.507/8.21	1.9/7.507
I _{pv}	7.635	2.1134
V _T	0.4733	0.9466
R _s	0.2667	0.5333
R _h	20	40
RMSE	0.2402	

Nota: Esta tabla muestra la comparación de la rodilla A y B, 2 submódulos. Elaboración propia.

Figura 38

Curva I-V con sombreado en 2 submódulos, cada uno afectado por un sombreado distinto



ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Nota: Esta figura muestra la comparación entre las curvas I-V con un sombreado parcial independiente en cada uno de los submódulos, experimental y teórica tomada con los parámetros ajustados. Elaboración propia.

Tabla 6

Parámetros para la curva I-V con sombreado en 2 submódulos, cada uno afectado por un sombreado distinto

Parámetro	Rodilla A	Rodilla B
Celdas en serie N_s	20	20
F_s	7.428/8.21	2.23/7.428
I_{pv}	7.5547	2.5068
V_T	0.4838	0.4838
R_s	0.2667	0.2667
R_h	20	20
RMSE	0.1342	

5. Conclusiones

Se diseñó y montó un sistema de medición que permitió evaluar el impacto del sombreado en el rendimiento de un GFV a través, de la selección de los equipos y elementos necesarios que garantizan mediciones fiables y representativas. El sistema de medición se configuró con éxito, lo que permitió la obtención de datos durante las mediciones experimentales.

Se llevaron a cabo mediciones experimentales de las curvas I-V y P-V en un pequeño GFV bajo diferentes escenarios de sombreado parcial. Estos experimentos proporcionaron datos que permitieron evaluar el efecto del sombreado en la eficiencia del generador, observando claramente que el sombreado parcial tiene un impacto significativo en la eficiencia del GFV; las curvas I-V y P-V reflejaron cambios notables en la generación de energía en función del nivel de sombreado.

Se estableció una metodología para calcular los factores de sombreado en un pequeño GFV. Esta metodología se basó en la adaptación de modelos matemáticos circuital existentes y se demostró como una herramienta para evaluar el impacto del sombreado en la generación de energía solar. La metodología desarrollada demostró ser efectiva para calcular los factores de sombreado en un pequeño GFV y los resultados se ajustaron de manera coherente a las condiciones experimentales.

El material desarrollado en este trabajo puede ser aplicado en proyectos de generación de energía solar a pequeña escala, permitiendo una mejor comprensión y gestión del sombreado. Las condiciones pueden ser extrapoladas a sistemas fotovoltaicos similares en diferentes ubicaciones geográficas, lo que contribuye a la mejora de la eficiencia energética. Este trabajo proporcionará una base sólida para el estudio del comportamiento y rendimiento de los paneles, tanto en aplicaciones de aprovechamiento de energía y diseño de sistemas fotovoltaicos, como en investigaciones futuras basadas en el modelo implementado, fomentando así el desarrollo y la

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

investigación en el campo de la energía solar como una fuente de energía limpia, al proporcionar una comprensión más completa del impacto del sombreado en la eficiencia de los paneles.

6. Recomendaciones

Se recomienda utilizar equipos de alta precisión que permitan la obtención de resultados cercanos a la realidad, ya que la exactitud de las mediciones depende en gran medida de la calidad de los instrumentos utilizados.

Se recomienda llevar a cabo las mediciones utilizando una carga programable, esta permite la obtención de un número específico y uniforme de muestras, garantizando que los resultados se aproximen a la realidad, al eliminar la influencia del error humano y el contacto directo.

Si se realiza la medición a distancias considerables entre el panel y la carga, se debe tener en cuenta la caída de tensión en el conductor debido a las pérdidas de resistencia que puede afectar la precisión de las mediciones. Por lo que es importante calcular y considerar estas pérdidas para obtener resultados más precisos.

Para obtener mediciones más cercanas a la realidad, se recomienda llevar a cabo las mediciones en condiciones climáticas ideales, preferiblemente sin nubes. Esto ayuda a minimizar las variables externas que pueden afectar los resultados y proporciona mediciones más representativas de la eficiencia del sistema bajo condiciones óptimas de radiación solar.

Se recomienda usar una carga con buena capacidad para poder obtener los datos del rango completo de la curva I-V, desde el punto de corto circuito hasta el de circuito abierto.

Referencias bibliográficas

- Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., Lanzolla, A., & Spadavecchia, M. (2009). *Parameters estimation for a model of photovoltaic panels*. Bari, Italia.
- Arenas, M, Bastidas, J., & Ramos-paja, C. (2022). Procedure Used to Estimate the Power Production of a Photovoltaic Module Operating under Partial Shading Conditions. *Computation*.
- Barrera, M. F. (2010). *Energía solar: Electricidad fotovoltaica*. Madrid: Liber Factory.
- Batzelis, E., & Papathanassiou, S. (2015). *A method for the analytical extraction of the single-diode PV model parameters*. Grecia.
- Di Gangi, A., & Orioli, A. (2012). *A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data*. Palermo.
- ENF Solar. (2023). *UP-M250-270P*. Obtenido de ENF Solar: <https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/42665>
- franchezso, franchezo, a., & vasrlosdas. (s.f). metodos. *MDPI*.
- Fuentes, F. (2020). *Estimación de parámetros de células fotovoltaicas mediante algoritmos de optimización*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Gómez, J., & Niño, N. (2021). *Estimación parámetros diodo baipás módulo fotovoltaico*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Iberdrola. (s.f). *Radiación solar: ¿cuál es su impacto sobre el planeta y el ser humano?* Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/compromiso-social/radiacion-solar#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20es%20aquella,las%20plantas%20entre%20otros%20procesos>.
- IDEAM. (2023). *RADIACIÓN SOLAR*. Obtenido de IDEAM.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Lamigueiro, O. P., Santos, A. C., & Castro, M. A. (2012). *Diseño de sistemas fotovoltaicos*. España: Promotora General de Estudios SA.

Lineykin, S., Averbukh, M., & Kuperman, A. (2013). *An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel*. Israel: Ariel University.

Orioli, A., & Di Gangi, A. (2012). *A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data*. Palermo: Università degli Studi di Palermo.

Orioli, A., & Di Gangi, A. (s.f.). *A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data*.

Petrone, G., Ramos-Paja, C. A., & Spagnuolo, G. (2017). *Photovoltaic Sources Modeling*. Wiley-IEEE Press.

Petrone, G., Ramos-Paja, C., & Spagnuolo, G. (2017). *Photovoltaic Sources Modeling*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd.

Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2007). *Analytical model of mismatched photovoltaic fields by means of Lambert Wfunction*.

Powerwerx. (2023). *Anderson Powerpole® and SB® Connectors*. Obtenido de Powerwerx: <https://powerwerx.com/anderson-power-powerpole-sb-connectors>

Stornelli, V., Mutillo, M., Rubeis, T., & Nardi, L. (2019). A New Simplified Five-Parameter Estimation Method for Single-Diode Model of Photovoltaic Panels. *MDPI*.

Tobajas, C. (2019). *Energía solar fotovoltaica*. Barcelona: Cano Pina.

Universidad Nacional de Quilmes. (2015). Diodo. Generalidades. Polarización. Modelos equivalentes. Tipos de diodos. Bernal, Argentina.

ESTIMACIÓN DE FACTORES DE SOMBREADO EN UN PGF

Velasco, J. G. (2012). Energías Renovables. Reverte. Obtenido de enelgreenpower:
<https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar>

West Mountain Radio. (2023). *Downloads*. Obtenido de
<http://www.westmountainradio.com/content.php?page=wmr-downloads>

Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A Fichas técnicas y manuales.

https://drive.google.com/drive/folders/1O-oBLOGojUqPwG2pWMUWCOyWrnvOQtWV?usp=drive_link

Este apéndice contiene fichas técnicas y manuales relacionados con el proyecto. Estos documentos suelen proporcionar información detallada sobre equipos, instrumentos, métodos de trabajo o procedimientos específicos utilizados en la investigación.

Apéndice B Códigos utilizados para los modelos matemáticos y gráficas.

https://drive.google.com/drive/folders/1pfcJdnC4coiFeiL_t8aOoGGsvuc5By64?usp=drive_link

Almacena los códigos de programación informática utilizados en la creación de modelos matemáticos y en la generación de gráficos relacionados con el proyecto. Los investigadores y otros interesados pueden consultar este apéndice para verificar la precisión y reproducibilidad de los resultados.

Apéndice C Base de datos con las muestras tomadas experimentalmente.

https://drive.google.com/drive/folders/1eNhL2A6aNYqaIHcpagZdAOP8A1cw74SG?usp=drive_link

En este apéndice se encuentra una base de datos que contiene las muestras experimentales recopiladas durante el desarrollo del proyecto.