



INAOE

Método de extracción de parámetros para el modelado de celdas y paneles solares.

por

M.C. Manuel Jesús Heredia Rios

Tesis presentada como requerimiento parcial para
obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Electrónica

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y
Electrónica**

Abril 2024

Sta. María Tonantzintla, Puebla

Bajo la supervisión de

Dr. Luis Hernández Martínez

Dr. Mónico Linares Aranda

©INAOE 2024

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y
distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en
partes mencionando la fuente.



Índice General

Resumen.....	5
Abstract	6
Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1. La energía solar en la actualidad.....	9
1.2. El estado actual de las tecnologías fotovoltaicas.....	9
1.3. Motivación.....	11
1.4. Objetivos.....	11
1.4.1. Objetivos generales.....	11
1.4.2. Objetivos específicos.....	11
Capítulo 2. Modelado de dispositivos fotovoltaicos.....	13
2.1. Tipos de modelo a partir del circuito equivalente.....	13
2.1.1. Modelo de diodo único (SDM).....	13
2.1.2. Modelo de doble diodo (DDM).....	16
2.1.3. Modelo de triple diodo (TDM).....	17
2.2. Métodos de extracción de parámetros.....	18
2.2.1. Métodos Iterativos.....	19
2.2.2. Optimización metaheurística.....	21
2.2.3. No iterativos.....	23
2.2.4. Gráficos.....	24
2.2.4.1. Análisis de imágenes.....	24
2.2.4.2. Procesamiento de imágenes.....	25
2.4. Comparación de modelos y métodos aplicados para la extracción de parámetros.....	25
2.5. Conclusiones.....	27
Capítulo 3. Proceso de fabricación de celdas solares de estructura simple.....	28

3.1. Celdas solares de estructura simple.....	28
3.1.1. Caracterización eléctrica.	30
3.1.2. Principales parámetros de desempeño.	32
3.1.3. Influencia de la profundidad de unión (x_j) en la eficiencia.....	34
3.1.4. Cálculo de la profundidad de unión.	36
3.1.5. Estimación teórica de la resistencia de hoja (R_{SH}).....	37
3.2. Pérdida de eficiencia debido a efectos eléctricos.	38
3.2.1. Pérdidas por recombinación (R_p).	40
3.2.2. Pérdidas óhmicas (R_s).	40
3.3 Conclusiones.	43
Capítulo 4. Análisis de parámetros característicos de SDM aplicando Newton-Raphson.....	44
4.1. Implementación del metodo de Newton-Raphson para la extracción de parámetros.	44
4.2. Influencia de los principales parámetros.	47
4.2.1. Temperatura (T).	47
4.2.2. Potencia radiante (G).....	51
4.2.3. Corriente fotogenerada (I_{PV}).....	52
4.2.4. Corriente de saturación inversa del diodo (I_0).....	53
4.2.5. Factor de idealidad del diodo (n).....	54
4.2.6. Resistencia en serie (R_s).	55
4.2.7. Resistencia en paralelo (R_p).....	56
4.3. Conclusiones.....	57
Capítulo 5. Método para la extracción de parámetros a partir del análisis de imágenes y pendiente de curva.	59
5.1. Procesamiento de imágenes de curvas I-V, proporcionadas por el fabricante.	59
5.2. Metodología para la extracción de parámetros para celdas y paneles solares.	60
5.3. Extracción de parámetros para celdas y paneles solares comerciales mediante el método propuesto.....	66

5.3.1. Celda solar RTC France	66
5.3.2. Panel solar KC200GT.....	67
5.3.3. Panel solar SP-144M.....	68
5.4. Extracción de parámetros para celdas solares fabricadas en INAOE.....	70
5.4.1. Evaluación de la potencia radiante emitida por la lámpara del simulador solar.....	71
5.4.2. Análisis del impacto de la temperatura generada por la lámpara del emulador solar en las celdas a nivel de oblea.	72
5.5. Extracción de parámetros para las celdas solares a nivel oblea de c-si fabricadas en INAOE.	77
5.5.1. Estimación teórica de la resistencia en serie (R_s) a partir de la profundidad de unión (x_j).	79
5.6. Trazado de curvas simuladas para la validación de parámetros obtenidos en la extracción.	93
5.6.1. Celda solar RTC France	94
5.6.2. Panel solar KC200GT Kyocera.....	97
5.6.3. Panel solar SP-144M.....	103
5.6.4. Celdas solares fabricadas en INAOE.	105
5.7. Discusión de resultados.....	110
5.8. Conclusiones.....	113
Capítulo 6.....	115
Trabajo a futuro	117
Referencias.	119

Resumen

La energía obtenida por radiación solar, es una de las más estudiadas, ya que está puede ser aplicada en casi cualquier parte del mundo, por lo que contar con dispositivos que aprovechen lo mejor posible la cantidad de luz que llega a la superficie terrestre, es un tema de investigación en desarrollo y contar con las herramientas necesarias para cumplir con dichos objetivos es indispensable.

Es por ello, que se tienen modelos que buscan representar con un mínimo de error a los dispositivos solares, siendo un tema de interés dentro del modelado, el de la extracción de parámetros, por lo que se implementan diversos métodos matemáticos para cumplir con dicha tarea, sin embargo, aún no pueden ser generalizados, para ser aplicados a diferentes tecnologías o dispositivos como lo son las celdas o paneles solares.

Al inicio del presente trabajo, se busca la mejora de uno de los métodos de extracción más aplicado (Newton-Raphson), para extraer los parámetros del modelo de diodo único (SDM), para paneles solares comerciales.

Buscando un método que pueda generalizar su aplicación, se propone un nuevo método gráfico, basado en métodos no iterativos y el cálculo de la pendiente de una recta que pasa por dos puntos, con el fin de calcular directamente la resistencia en serie (R_s) y la resistencia en paralelo (R_p), sobre la curva I-V, tanto la proporcionada por el fabricante en la hoja de datos (aplicando el análisis de imágenes), como curvas experimentales obtenidas por caracterización eléctrica con ayuda de un simulador solar.

Teniendo como resultado, un método que es capaz de extraer parámetros tanto de dispositivos comerciales como celdas y paneles solares, como de dispositivos fabricados en INAOE.

Abstract

Solar radiation energy is one of the most studied forms of energy, as it can be applied almost anywhere in the world. Therefore, having devices that can optimally harness the amount of light reaching the Earth's surface is an area of ongoing research, and having the necessary tools to achieve these objectives is essential.

As a result, models are developed to represent solar devices with minimal error. A key area of interest within modeling is parameter extraction, and various mathematical methods are implemented to accomplish this task. However, these methods have yet to be generalized for application to different technologies or devices such as solar cells or panels.

At the beginning of this work, we aim to improve one of the most commonly applied extraction methods (Newton-Raphson) to extract the parameters of the single diode model (SDM) for commercial solar panels.

Seeking a method that can generalize its application, we propose a new graphical method based on non-iterative methods and the calculation of the slope of a line passing through two points. This allows for the direct calculation of series resistance (R_s) and parallel resistance (R_p) on the I-V curve, both from the manufacturer's data sheet (using image analysis) and from experimental curves obtained through electrical characterization with the aid of a solar simulator.

As a result, we have developed a method capable of extracting parameters from both commercial devices, such as solar cells and panels, and devices manufactured at INAOE.

Capítulo 1. Introducción

Debido a los acontecimientos recientes a nivel global, como la pandemia de COVID-19 en 2019 y la invasión de la federación Rusa a Ucrania en 2022, los gobiernos han aumentado su enfoque en la seguridad del suministro de energía. Como respuesta a la inflación, interrupciones en el suministro y la volatilidad de los precios, han optado por centrarse en la adopción de fuentes de energía renovable [1].

Estos sucesos han incrementado el interés global en realizar una transición a largo plazo lejos de los combustibles fósiles, con el propósito de alcanzar metas relacionadas con la seguridad energética y la lucha contra el cambio climático. Numerosos países han establecido nuevos objetivos o políticas de apoyo más ambiciosos dirigidos a promover las energías renovables [2].

Durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2022, se instó a los gobiernos a reevaluar y mejorar sus metas de reducción de emisiones para 2030 en sus planes climáticos nacionales, así como a acelerar la reducción del uso de energía basada en carbón y petróleo [3]. Los gobiernos hicieron énfasis en la importancia de integrar fuentes de energía con bajas emisiones y energías renovables para diversificar las fuentes y sistemas de energía. El acuerdo final enfatizó la urgencia de invertir en las energías renovables, tanto en tecnología e infraestructura, hasta 2030 con el fin de lograr emisiones netas de gases de efecto invernadero iguales a cero para el año 2050 [4].

A raíz de lo expuesto anteriormente, hay un interés marcado en el avance de tecnologías relacionadas con celdas solares, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la conversión de energía lumínica en energía eléctrica. En consecuencia, el desarrollo de herramientas destinadas a facilitar la investigación de estos dispositivos representa un área de gran relevancia en la actualidad.

1.1. La energía solar en la actualidad.

Durante el año 2022, la capacidad total de generación de energía a nivel mundial experimentó un incremento del 4.1% en comparación con el crecimiento observado en 2021 [5]. La transición hacia fuentes de energía renovable no solo se ha centrado en la generación de energía, sino también en tecnologías específicas dentro del sector eléctrico.

En el año 2022, la energía solar fotovoltaica y la energía eólica representaron el 92% de la capacidad total de generación de energía renovable, con una participación del 70% para la solar y del 22% para la eólica [6]. La capacidad instalada de energía solar alcanzó los 1,185 GW, mientras que la capacidad de energía eólica llegó a los 906 GW.

En total, se añadieron 348 GW de capacidad de energía renovable durante ese año, lo que representa un aumento del 13% en comparación con los 306 GW generados en 2021 [7]. En términos generales, a pesar de los desafíos experimentados en los principales mercados globales, la energía renovable ha demostrado su capacidad de adaptación, siendo la energía solar la principal contribuyente en la búsqueda de alcanzar cero emisiones para el año 2050.

1.2. El estado actual de las tecnologías fotovoltaicas.

La energía fotovoltaica desempeña un papel significativo en la actual transformación hacia una sociedad con reducidas emisiones de carbono. A pesar de que se han empleado diversos materiales en la fabricación de celdas solares, la mayoría de los paneles fotovoltaicos, fabricados en el pasado y que continúan siendo producidos en la actualidad, se fundamentan en el uso del silicio, que es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, después del oxígeno, por lo que, la tecnología basada en obleas de silicio cristalino es la que marcaría los primeros pasos de la era fotovoltaica [8,9,10].

De acuerdo a lo anterior, es posible clasificar las generaciones de celdas solares de la siguiente manera [11]:

- **Primera generación:** Esta categoría abarca la tecnología que se basa en silicio monocristalino, es decir, c-Si.

- **Segunda generación:** Comprende tecnologías de películas delgadas, que incluyen todas las celdas solares con absorbedores de espesor reducido, del orden de pocos micrómetros, como CdTe, CIGSe, CZTSe, perovskita, a-Si, celdas sensibilizadas con colorantes y orgánicas. Además, se incluyen en esta categoría las celdas solares III-V debido al grosor del absorbedor.
- **Tercera generación:** Esta generación engloba tecnologías capaces de superar el límite de Shockley-Queisser [12], como dispositivos multiunión y concentradores. También se clasifican aquí una amplia gama de otros conceptos, como celdas solares de punto cuántico o de banda prohibida intermedia.

La Figura 1 representa de manera gráfica la situación actual de las tecnologías fotovoltaicas, incluyendo las eficiencias récord que se han logrado para cada una de ellas.

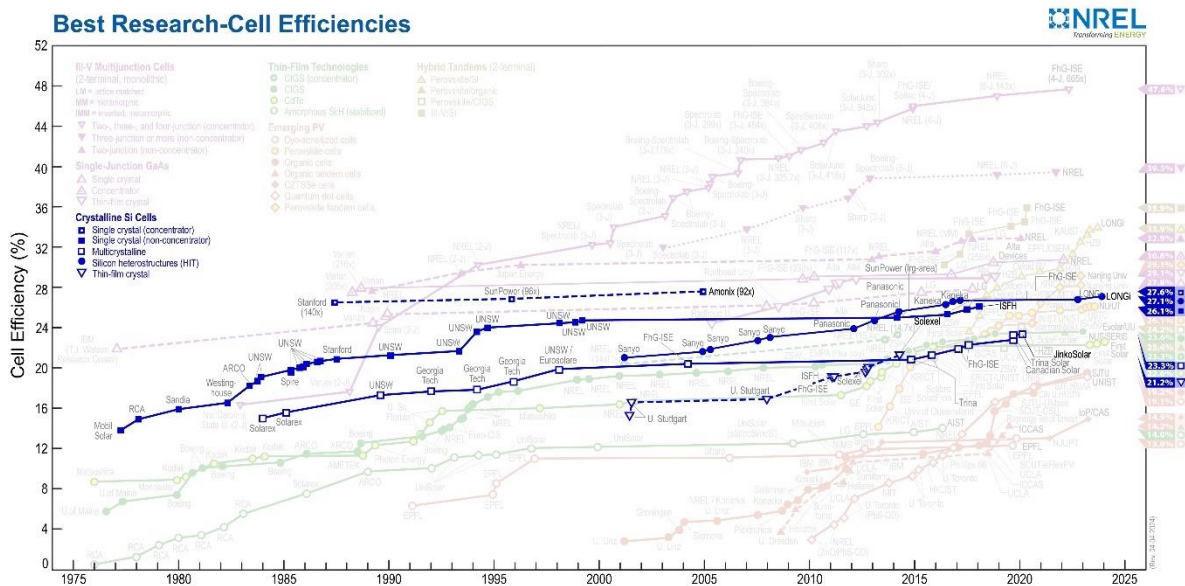


Figura 1. Evolución histórica de la eficiencia para la tecnología basada en silicio cristalino (c-Si), desde 1976 – mayo 2024 [13].

A pesar del avance en el desarrollo de nuevas tecnologías fotovoltaicas y las altas eficiencias que algunas de ellas han alcanzado (perovskita = 40% eff); el éxito duradero de las tecnologías basadas en silicio cristalino (c-Si) en las décadas recientes se debe a la capacidad de desglosar la cadena de producción del c-Si en etapas independientes, que abarcan desde su extracción hasta la formación del panel [11].

En las últimas tres décadas, la industria de la energía solar, fundamentada en el silicio, ha experimentado una transformación significativa. Lo que en sus inicios fue un

fenómeno intrigante en el campo de la energía, hoy en día es reconocido como una de las fuentes primordiales de electricidad, tal como lo ha señalado la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) [17]. En consecuencia, la tecnología basada en silicio continuará desempeñando un papel fundamental en las próximas décadas [18].

1.3. Motivación.

Para hacer frente al desafío del cambio climático y avanzar hacia un futuro libre de emisiones para el año 2050 mediante el uso de energías renovables, es crucial contar con las herramientas adecuadas para investigar los dispositivos fotovoltaicos. Estas herramientas no solo impulsarán la participación de más países en todo el mundo para alcanzar esta meta, sino que también promoverán la mejora de la eficiencia y la implementación de tecnologías innovadoras. Dichas herramientas pueden ser desarrolladas a partir de modelos y métodos apropiados que permitan un estudio detallado de estos dispositivos fotovoltaicos, identificando y reduciendo las pérdidas en desempeño o, en este caso específico, de eficiencia. Esto conducirá a un avance tecnológico que resultará en beneficios tanto económicos como ambientales para la humanidad.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivos generales

A partir del modelo de celdas solares, se busca desarrollar un método que facilite el estudio y análisis de las pérdidas presentes en los dispositivos fotovoltaicos. Este método no se limitará a un tipo específico de dispositivo (celda o panel), sino que permitirá analizar ambos. Además, posibilitará la realización del estudio sin la necesidad de disponer directamente del equipo de caracterización eléctrica para obtener la curva característica de los dispositivos fotovoltaicos (Curva I-V). De esta manera, se promueve la participación de países y centros de investigación que aún no tienen acceso completo, tanto en términos económicos como tecnológicos, al campo de la energía fotovoltaica. El método diseñado permitirá extraer los parámetros clave que describen el comportamiento de celdas y paneles solares, ya sean de uso comercial o fabricadas en INAOE.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Análisis del modelado de celdas y paneles solares.

- Caracterización de celdas elaboradas en INAOE.
- Estudio y análisis de las pérdidas de eficiencia en las celdas producidas en INAOE, vinculadas al proceso de fabricación.
- Desarrollo de una herramienta de software para la extracción de parámetros en celdas y paneles solares, considerando variaciones de temperatura y potencia radiante.
- Comparativa del método propuesta con otros métodos utilizados para extraer parámetros en celdas y paneles solares.

La tesis está estructurada en 6 capítulos. El primer capítulo comprende una introducción donde se destaca la importancia del desarrollo de las energías renovables, con énfasis en la energía fotovoltaica, y se mencionan las herramientas necesarias para su estudio. En el segundo capítulo, se aborda el modelado de dispositivos fotovoltaicos, detallando las ecuaciones fundamentales que los describen y los métodos utilizados para resolver el sistema de ecuaciones correspondiente. El tercer capítulo se dedica al proceso de fabricación de celdas solares de estructura simple, desarrolladas en los laboratorios de INAOE, y se describe la caracterización necesaria para obtener las curvas I-V. En el cuarto capítulo, se presenta un análisis sobre la influencia de los parámetros clave en el comportamiento de un dispositivo solar, utilizando el método de Newton-Raphson. El quinto capítulo expone la metodología desarrollada y presenta varios casos de estudio que consideran celdas solares de INAOE y comerciales, utilizando el método propuesto y comparándolo con otros enfoques. Finalmente, el sexto capítulo contiene las conclusiones y señala posibles líneas de trabajo futuro.

Capítulo 2. Modelado de dispositivos fotovoltaicos.

2.1. Tipos de modelo a partir del circuito equivalente.

Los dispositivos fotovoltaicos son capaces de transformar la energía lumínica en energía eléctrica, por lo que el desarrollo de herramientas para analizar estos dispositivos es un área de interés actual. El estudio de estos dispositivos puede realizarse a través de su circuito equivalente general, siendo la extracción de parámetros uno de los temas fundamentales en el modelado de las celdas solares [19].

Para investigar el comportamiento de las celdas solares, se han diseñado y evaluado distintos modelos representativos. Entre ellos se encuentran el modelo de diodo simple, el modelo de doble diodo y el modelo de triple diodo. Al analizar cualquiera de estos modelos y extraer los parámetros principales, el diseñador puede examinar cómo se comportan las celdas en diversas condiciones de funcionamiento. A lo largo de los años, los modelos más utilizados han sido el modelo de diodo único y el modelo de doble diodo debido principalmente a que la complejidad para analizar el circuito equivalente crece a medida que aumenta el número de diodos [20,21].

2.1.1. Modelo de diodo único (SDM).

En el modelado de dispositivos fotovoltaicos, se emplean circuitos eléctricos, conocidos como circuitos equivalentes, con el propósito de representar el funcionamiento de estos dispositivos [22]. Estos circuitos suelen estar compuestos

esencialmente por una fuente de corriente, un diodo en paralelo y resistencias que representan las pérdidas (Figura 2.1).

En la Figura 2.1 se presenta el circuito equivalente que en general representa a los dispositivos fotovoltaicos, conocido también como el modelo de diodo único o el modelo de cinco parámetros. La ecuación (2.1) es la ecuación general que describe el comportamiento de los dispositivos fotovoltaicos [23].

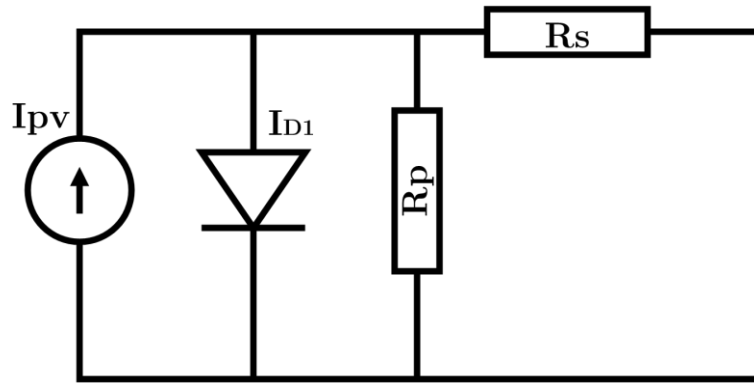


Figura 2.1. Circuito equivalente de dispositivos fotovoltaicos, modelo de diodo único (SDM)

$$I_{SC} = I_{PV} - I_{D1} - I_{SH} \quad (2.1)$$

I_{SC}	Corriente del dispositivo celda/panel solar
I_{PV}	Corriente fotogenerada
I_{D1}	Unión <i>pn</i>
I_{SH}	Resistencias de pérdidas.

Las ecuaciones que definen a cada uno de los componentes de la ecuación 2.1 se dan a continuación: [24]

$$I_{PV} = I_{PV,ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (2.2)$$

Donde

$I_{PV,ref}$ = corriente fotogenerada de referencia.

G = radiación ambiente.

G_{ref} = radiación de referencia (1000 W/m²).

El segundo componente de la corriente a través de la unión pn , está definida por la ecuación (2.3) [25,26]

$$I_{D1} = I_0 \left(e^{\frac{q(V_{D1} + I_{D1}R_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Donde

I_0 = corriente inversa de saturación del diodo.

I_{sc} = corriente de cortocircuito.

V_{oc} = voltaje de circuito abierto.

R_s = resistencia en serie.

n = factor de idealidad del diodo.

q = carga del electrón.

k = constante de Boltzman.

T = Temperatura en grados Kelvin.

Por último, el tercer término de la ecuación 2.1, es referida a las pérdidas asociadas a las resistencias serie (R_s) y paralelo (R_p) [27].

$$I_{SH} = \frac{V_{oc} - I_{sc}R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

De esta manera la ecuación 2.1 puede expresarse por la ecuación 2.5

$$I_{SC} = I_{PV} - I_0 \left(e^{\frac{V_{OC} + I_{SC} R_s}{nV_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{OC} - I_{SC} R_s}{R_p} \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5, define al modelo de un solo diodo y los parámetros de interés que la conforman son

I_{PV} = corriente fotogenerada.

I_0 = corriente de saturación inversa del diodo.

n = factor de idealidad del diodo

R_s = resistencia en serie.

R_p = resistencia en paralelo.

Como se presenta anteriormente, son cinco los parámetros de interés los que definen al modelo de un solo diodo, por lo que también es conocido como modelo de cinco de parámetros [28].

2.1.2. Modelo de doble diodo (DDM)

Una alternativa para el modelado de dispositivos fotovoltaicos es el DDM (modelo de doble diodo). Su representación en forma de circuito equivalente se ilustra en la Figura 2.2 [29]. Este modelo posee la característica de simular tanto las pérdidas presentadas en el SDM (modelo de diodo único), como las pérdidas ocasionadas por la recombinación de portadores en la región de agotamiento [30].

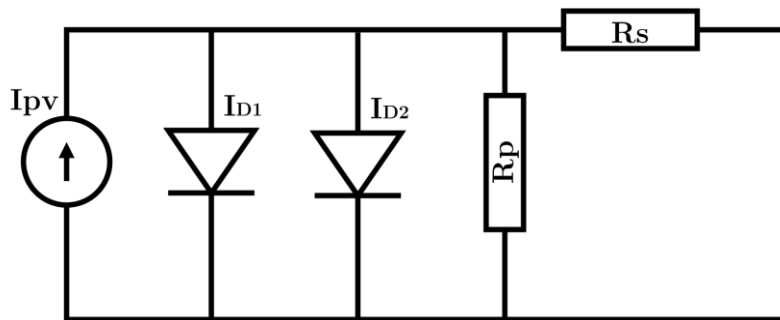


Figura 2.2. Circuito equivalente de modelo de doble diodo (DDM).

El modelo representado en la Figura 3 adquiere mayor relevancia cuando el dispositivo solar se encuentra en condiciones de baja potencia radiante [31].

La ecuación que define este modelo es la siguiente [30]:

$$I_{SC} = I_{PV} - I_{O1} \left(e^{\frac{V_{D1} + I_{D1} R_s}{n_1 V_{th}}} - 1 \right) - I_{O2} \left(e^{\frac{V_{D2} + I_{D2} R_s}{n_2 V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{OC} - I_{SC} R_s}{R_p} \quad (2.6)$$

Para determinar el valor de I_{O2} , esta puede ser calculada por la siguiente ecuación [27]:

$$I_{O2} = \frac{T^{\frac{2}{5}}}{3.77} I_{O1} \quad (2.6)$$

Algunos autores sugieren (con el fin de simplificar los cálculos), que, la corriente de saturación (I_{O2}) tiene un valor de tres a cinco veces superior a la corriente I_{O1} , tal como lo expresa la ecuación 2.6, considerando las variaciones de temperatura [28].

En lo que respecta a los factores de idealidad de los dos diodos, para reducir el número de parámetros a calcular, se suele indicar con frecuencia en la literatura que el primero tiene un valor de 1, mientras que el segundo tiene un valor de 2 [33]. Otros autores consideran que tienen rangos de variación para $1 < n_1 < 1.5$ y $2 < n_2 < 5$ [34].

2.1.3. Modelo de triple diodo (TDM).

El modelo de triple diodo (figura 2.3.), se emplea comúnmente para obtener las características eléctricas de las celdas solares de silicio amorfo (a-Si). Considerando las pérdidas asociadas al DDM, se incluye un diodo adicional en paralelo para formar el modelo de triple diodo (TDM), como se muestra en la Figura 2.3 [35].

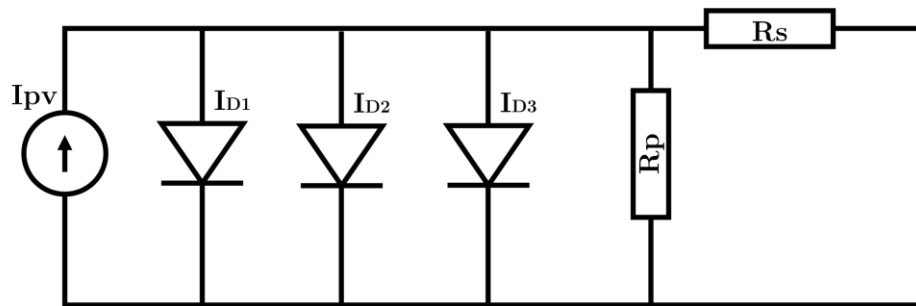


Figura 2.3. Circuito equivalente de modelo de triple diodo (TDM).

Sin embargo, debido a la complejidad del proceso de extracción de parámetros, su aplicación se encuentra bastante restringida [36].

La ecuación que define a este modelo es la siguiente [35]:

$$I_{sc} = I_{pv} - I_{01} \left(e^{\frac{q(V_{D1} + I_{D1} R_s)}{n_1 k T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{q(V_{D2} + I_{D2} R_s)}{n_2 k T}} - 1 \right) - I_{03} \left(e^{\frac{q(V_{D3} + I_{D3} R_s)}{n_3 k T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_p} \quad (2.7)$$

Como se expresa en la ecuación (2.7), el modelo de triple diodo implica la determinación de nueve parámetros desconocidos.

Algunos autores [34] sugieren simplificaciones para abordar la complejidad de la ecuación (2.7), como asignar valores específicos al factor de idealidad de cada diodo en el modelo, por ejemplo, $n_1 = 1$, $n_2 = 2$ y $n_3 > 2$, especialmente en el caso de celdas basadas en tecnología de silicio (Si).

Por otro lado, hay autores [37], que prefieren un incremento gradual en los valores de cada factor de idealidad (n_{1-3}), manteniendo diferencias mínimas entre ellos. Sin embargo, es importante destacar que el cálculo y obtención precisa de este parámetro presenta desafíos que se abordarán en secciones posteriores.

2.2. Métodos de extracción de parámetros.

Además de la elección del modelo, un paso crucial que contribuye a mejorar el modelado de las celdas fotovoltaicas es la estimación de sus parámetros desconocidos. En el proceso de modelado fotovoltaico, la determinación precisa de cada parámetro desconocido es igualmente importante [38].

La extracción de parámetros para el modelo fotovoltaico (PV) sigue siendo un tema de investigación vigente. La literatura ofrece numerosos métodos, los cuales difieren significativamente en términos de precisión, complejidad, aplicabilidad y características inherentes [39].

La figura 2.4 ilustra de manera más clara la clasificación de los métodos de estimación de parámetros.

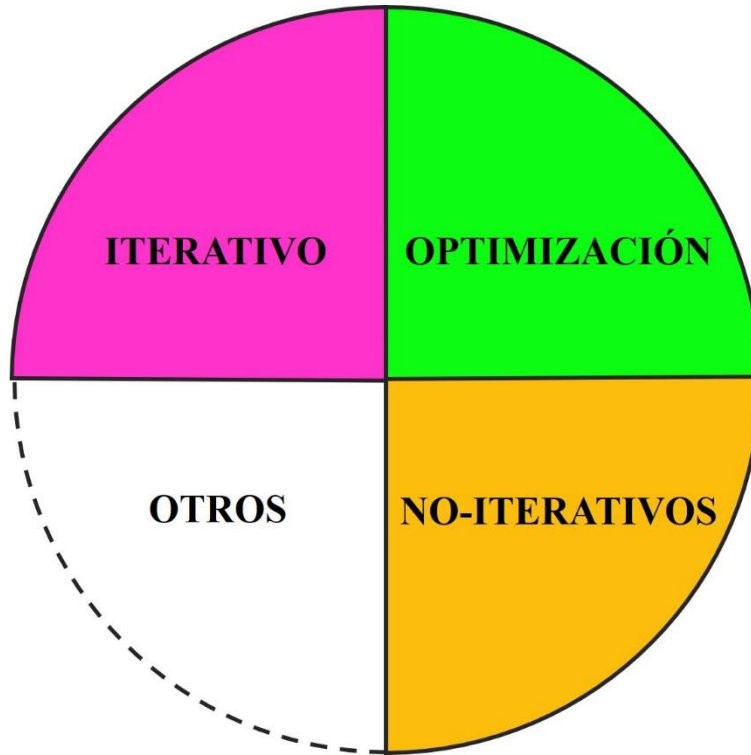


Figura 2.4. Métodos de extracción de parámetros, para el modelado de dispositivos solares.

2.2.1. Métodos Iterativos.

Uno de los enfoques más sencillos para identificar los parámetros desconocidos en sistemas fotovoltaicos consiste en aplicar condiciones de operación específicas y emplear un método de prueba y error para su determinación [40]. Sin embargo, esta técnica es de eficacia limitada, ya que los valores predichos pueden variar considerablemente, se ha vuelto común recurrir a métodos analíticos o iterativos en la búsqueda de una solución más precisa [38].

En ese contexto, se obtiene una característica fotovoltaica no lineal al aplicar diversas condiciones operativas, utilizando al mismo tiempo los valores proporcionados en la hoja de datos del fabricante, tales como: (a) corriente en el punto de máxima potencia (I_{MP}), (b) voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MP}), (c) corriente de cortocircuito (I_{sc}), y (d) Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) [41].

Utilizando los datos proporcionados por el fabricante para un panel de energía fotovoltaica (FV), se establece un sistema de ecuaciones no lineales al ajustar la ecuación (2.5) a la curva I-V en distintos puntos de operación.

Utilizando los datos proporcionados por el fabricante para un panel de energía fotovoltaica, basado en el modelo de diodo único (SDM), se establece un sistema de ecuaciones no lineales al ajustar la ecuación (2.5) a la curva I-V en distintos puntos de operación [28].

Para $(0, I_{SC})$

$$I_{PV} - I_0 \left(e^{\frac{I_{SC} R_s}{n V_{th}}} - 1 \right) - \frac{I_{SC} R_s}{R_p} - I_{SC} = 0 \quad (2.8)$$

Para (V_{MPP}, I_{MPP})

$$I_{PV} - I_0 \left(e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{n V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{MPP} - I_{MPP} R_s}{R_p} - I_{MPP} = 0 \quad (2.9)$$

Para $(V_{OC}, 0)$

$$I_{PV} - I_0 \left(e^{\frac{V_{OC}}{n V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{OC}}{R_p} = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{Para } \left. \frac{\partial I_{PV}}{\partial V_{PV}} \right|_{MPP} = - \frac{I_{MPP}}{V_{MPP}}$$

$$- \frac{I_{MPP}}{V_{MPP}} = - \frac{\frac{1}{R_s} + \frac{I_0}{n V_{th}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{n V_{th}}}}{1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{R_s I_0}{n V_{th}} e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{n V_{th}}}} \quad (2.11)$$

$$\text{Para } \left. \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} \right|_{MPP} = 0$$

$$\frac{n V_{th} [(I_{PV} + I_0) R_p - 2 V_{MPP}]}{I_0 R_s R_p e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{n V_{th}}} + n V_{th} (R_s + R_p)} + \frac{I_0 R_p e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{n V_{th}}} [I_{MPP} R_s + (V_{MPP} - 2 n V_{th})]}{I_0 R_s R_p e^{\frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{n V_{th}}} + n V_{th} (R_s + R_p)} = 0 \quad (2.12)$$

Este enfoque tiene como objetivo generar un conjunto suficiente de ecuaciones para calcular los valores de I_{PV} , I_0 , n , R_s y R_p . Comúnmente se seleccionan los puntos de cortocircuito, máxima potencia y circuito abierto debido a su fácil identificación en la curva I-V y a que son proporcionados de manera consistente por el fabricante de

paneles solares en la hoja de datos, generalmente dadas bajo condiciones estándar (STC) [24,28].

El sistema de ecuaciones no lineales representado por las ecuaciones (2.8) a (2.12) puede resolverse a través de métodos iterativos numéricos basados en el ajuste de curvas o la búsqueda de raíces [28].

Una forma sencilla consiste en emplear un modelo de parámetros constantes [42], en el cual se presupone que solo I_{PV} e I_0 experimentan cambios por las condiciones ambientales, a diferencia de otros parámetros como, R_s y R_p , que se consideran constantes para una condición específica [43]. No obstante, mantener constantes la mayoría de los parámetros en el modelo resulta demasiado idealista, dado que, desde una perspectiva física, estos son sumamente sensibles a variaciones de radiación solar (G) y de temperatura (T) [44,45].

Otros de los procedimientos más conocidos para encontrar la solución de sistemas no lineales, son el método de bisección y el método de Newton-Raphson, ambos pertenecientes a la categoría de búsqueda de raíces [28].

Aunque estas metodologías ofrecen resultados precisos en ciertos casos, especialmente el método Newton-Raphson (por su fácil implementación) [24], es importante destacar que los resultados dependen de la elección de la solución inicial y la convergencia puede no lograrse.

2.2.2. Optimización metaheurística.

Una alternativa para superar las limitaciones de los métodos iterativos en la extracción de parámetros de dispositivos fotovoltaicos, son los métodos de optimización metaheurística. Es de destacar que, los resultados obtenidos mediante estos métodos concuerdan eficazmente con las características reales de la curva de energía solar fotovoltaica, logrando minimizar los errores [38].

El concepto de "metaheurística" implica un "nivel superior de heurísticas en donde la palabra, "meta" denota un nivel más elevado o más allá, mientras que "heurística" se refiere a la búsqueda o descubrimiento de un objetivo a través de métodos de prueba y error. Estos algoritmos suelen clasificarse en categorías que abarcan técnicas basadas en la evolución, en la naturaleza, en el ser humano y en enfoques bio-inspirados (figura 2.5) [46].

Entre los métodos basados en humanos se incluyen: sistema inmunológico artificial (AIS), búsqueda de armonía (HS), algoritmo competitivo imperialista (ICA), optimización basada en el aprendizaje y la enseñanza (TLBO), optimización basada en biogeografía (BBO) y algoritmo de búsqueda gravitacional (GSA). Otro tipo de métodos de optimización son los basados en naturaleza, como: algoritmo de optimización del viento (WOA), algoritmo de polinización de flores (FPA), algoritmo basado en el ciclo del agua con tasa de evaporación (ERWCA), recocido simulado (SA), búsqueda de patrones (PS) [47], etc.

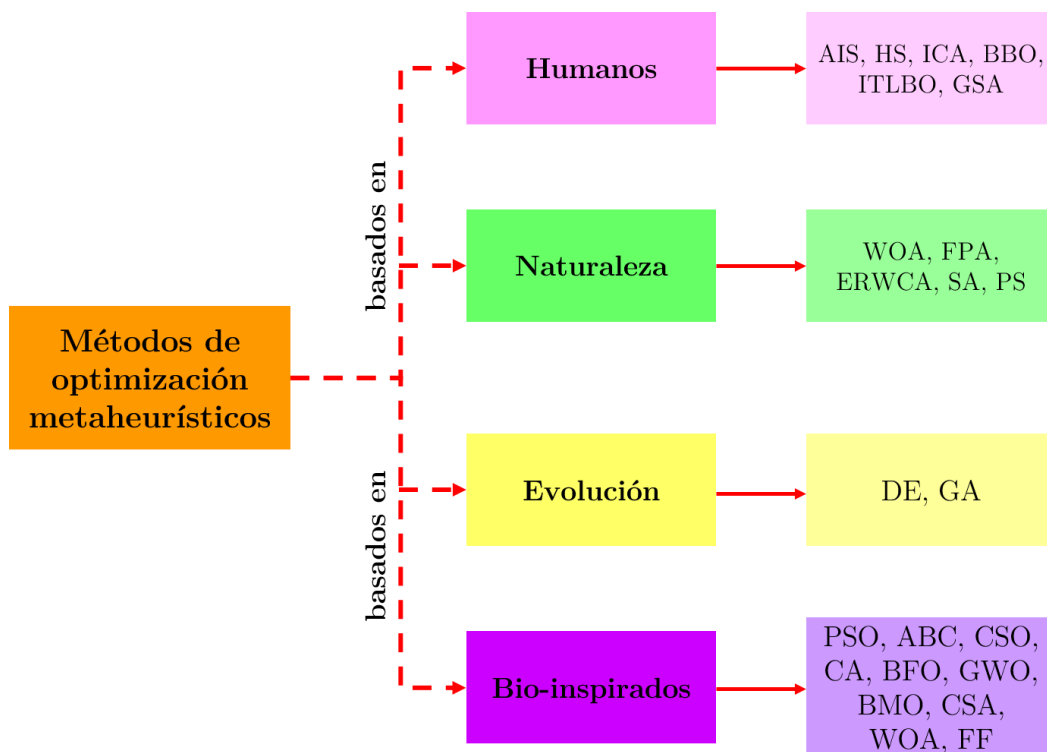


Figura 2.5. Métodos optimización metaheurísticos, para la extracción de parámetros.

Los métodos de optimización basados en evolución pueden ser: evolución diferencial (DE) y algoritmos genéticos (GA). Los métodos bio-inspirados: optimización por enjambre de partículas (PSO), colonia artificial de abejas (ABC), optimización de enjambre de gatos (CSO), algoritmo de cuco (CA), optimización por forrajeo bacteriano (BFO), optimización de lobo gris (GWO), optimización de apareamiento de aves (BMO), algoritmo de búsqueda de cuervos (CSA), algoritmo de optimización de ballenas (WOA) y luciérnaga (FF) [47].

Los métodos metaheurísticos siguen un procedimiento de ajuste de curva para predecir la curva I-V, ajustando cada punto de datos en la curva I-V predicha, con los valores reales. La figura 2.6, muestra de forma general cómo trabajan los algoritmos metaheurísticos para la extracción de parámetros [48].

En el diagrama de bloques de la figura 2.6, se muestra que los métodos de optimización requieren un conjunto de puntos, los cuales pueden obtenerse mediante experimentación (mediciones previas) o accediendo a una base de datos que contenga dichos puntos. Luego, se selecciona el tipo de algoritmo que se desea aplicar y, finalmente, se define la función objetivo que caracteriza al tipo de algoritmo para lograr la extracción de parámetros [47].

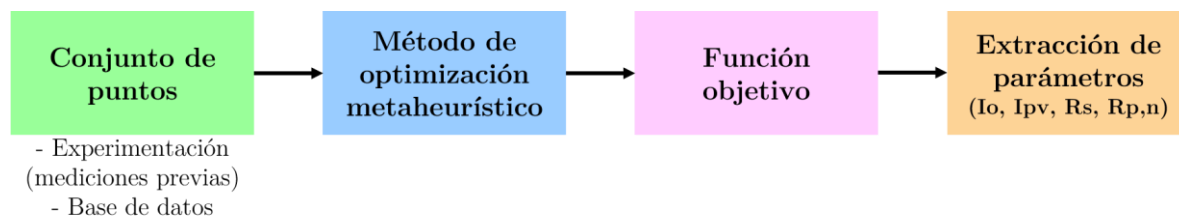


Figura 2.6. Proceso de extracción de parámetros por métodos de optimización metaheurísticos.

La aplicación de este tipo de métodos permite obtener una precisión elevada y una optimización prácticamente global, pero se ve afectada por la complejidad computacional y las dificultades en el ajuste de los parámetros del método [49].

2.2.3. No iterativos.

Los métodos no iterativos, conocidos también como explícitos, directos o analíticos, emplean un conjunto de ecuaciones que se resuelven de manera simbólica o explícita, sin requerir iteraciones, este enfoque conlleva a una formulación e implementación más sencilla [49].

Estos métodos son esencialmente variantes de la clase iterativa y se utilizan simplificaciones y observaciones empíricas para lograr una formulación explícita [39].

Algunos de estos métodos utilizan un sistema de ecuaciones fundamentado en la información proporcionada por el fabricante en la hoja de datos [49,50]. Estos métodos tienden a simplificar el sistema para reducir el número de parámetros a extraer [51-

53]. A menudo, se aborda una resistencia de pérdida a la vez, requiriendo mediciones previas para el cálculo de las resistencias R_s y R_p [54-56].

La preferencia por un método de extracción de parámetros no iterativo se justifica principalmente debido a su baja complejidad y un tiempo de ejecución más corto [39]. No obstante, es importante tener en cuenta que la introducción de simplificaciones o la presencia de ruido en la curva obtenida pueden dar lugar a resultados con mayor error.

2.2.4. Gráficos.

Un gráfico es una de las representaciones más eficientes para mostrar la relación entre dos variables. Por lo general, la variable independiente (controlada por el experimentador) se sitúa en el eje x . La variable dependiente (aquella que responde a los cambios en la variable independiente) se sitúa en el eje y . Es crucial poder interpretar un gráfico y expresarlo mediante una declaración escrita y una expresión algebraica [57].

2.2.4.1. Análisis de imágenes.

El análisis de imágenes, considerado como un conjunto de gráficos, juega un papel fundamental al reconocer, diferenciar y cuantificar una variedad de imágenes, incluyendo aquellas en escala de grises, a color y multiespectrales [58].

En el pasado, la investigación sobre análisis de imágenes estaba principalmente restringida a la comunidad de ciencias de la computación, enfocándose en imágenes simples para aplicaciones como detección de defectos, segmentación y clasificación [59].

No obstante, en la actualidad, el análisis de imágenes ha ganado creciente importancia y aplicabilidad en otras áreas debido a su capacidad para realizarse de manera más conveniente, rápida y rentable. Este enfoque se ha implementado en diversos campos de la ciencia y la tecnología [60].

Es fundamental destacar que el análisis de imágenes constituye una faceta dentro de un ámbito más extenso denominado procesamiento de imágenes, que tiene como objetivo fundamental mejorar la calidad visual de una imagen y/o extraer información o características útiles. Este análisis se fundamenta en diversas propiedades de la imagen, tales como el color, el brillo, la morfología de los objetos y la textura [59].

2.2.4.2. Procesamiento de imágenes.

El término "procesamiento de imágenes" hace referencia a los procedimientos mediante los cuales se modifica o ajusta la información contenida en una imagen, generalmente con el propósito de restaurar visualmente la imagen u optimizarla. Estos procedimientos incluyen, entre otros, la corrección de la nitidez afectada por un enfoque deficiente, la corrección de errores ópticos de las lentes, el ajuste del contraste, la intensidad o el brillo, la corrección del color, la mejora de la estructura de la imagen para resaltar elementos que no son fácilmente visibles en la imagen original, y la eliminación del ruido de fondo [59,60].

2.4. Comparación de modelos y métodos aplicados para la extracción de parámetros

Durante la revisión del estado del arte, presentada en los apartados anteriores, se observaron algunas ventajas y desventajas, de los modelos y métodos implementados para llevar a cabo la extracción de parámetros.

En la tabla 2.1, se muestra una comparación entre los tres modelos generalmente implementados para la obtención de la curva I-V simulada.

Tabla 2.1.

Comparación entre modelos implementados para la simulación de dispositivos solares.

Modelo	Ventaja	Desventaja
SDM (Modelo de diodo único)	<ul style="list-style-type: none"> • Número reducido de parámetros. • Puede reproducir una curva I-V simulada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Error de aproximación punto a punto en ciertas zonas entre curva simulada y curva experimental.
DDM (Modelo de doble diodo) y TDM (Modelo de triple diodo)	<ul style="list-style-type: none"> • Puede reproducir una curva I-V simulada. • Bajo error de aproximación punto a punto en ciertas zonas, entre curva simulada y curva experimental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Número elevado de parámetros. • Complicación para el cálculo de parámetros. • Asignación de valores iniciales para reducir el número de parámetros a calcular, lo que condiciona los resultados obtenidos y el trazo de la curva I-V simulada.

De la tabla anterior se concluye de manera parcial que, el modelo de diodo único (SDM), tiene un número reducido de parámetros y por ende no necesita de valores iniciales que condicionen los cálculos a realizar y acoten o restrinjan el trazo de la curva I-V simulada. Por lo que la implementación de un método adecuado para resolver la ecuación que describe al SDM, puede ayudar a reducir el error punto a punto en ciertas zonas entre la curva simulada y curva experimental.

Por lo mencionado anteriormente, en la tabla 2.2, se muestra una comparación entre los métodos implementados para la solución a la ecuación que describe a cada modelo presentado en la tabla 2.1.

Tabla 2.2.

Comparación entre métodos implementados para la solución de la ecuación que describe a cada modelo implementado para la simulación de dispositivos solares.

Método	Ventaja	Desventaja
No iterativos.	<ul style="list-style-type: none"> • Baja carga computacional. • No presenta problemas de caer en mínimos locales. • Búsqueda de solución en tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesitan mediciones previas para el cálculo de ciertos parámetros. • No es aplicable para DDM y TDM.
Iterativos	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser programado para su implementación y que la búsqueda de soluciones sea de forma autónoma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita valores iniciales. • Problemas de caer en mínimos locales y no llegar a una solución. • Carga computacional elevada, por el número de iteraciones para llegar a una solución.
Optimización	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser programado para su implementación y que la búsqueda de soluciones sea de forma autónoma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesita una base de datos para su implementación. • Si la función objetivo no está bien definida no se llega a una solución. • Carga computacional elevada.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los tres modelos generalmente implementados para la representación de celdas/paneles solares. A partir de dicho circuito equivalente, el sistema de ecuaciones a resolver se vuelve más complejo dependiendo del número de diodos usados en cada modelo. Por ello, se han implementado diversos métodos para el cálculo (extracción) de los parámetros característicos del modelo a analizar y así obtener una curva I-V simulada que se aproxime con el menor error posible a la curva experimental.

El error de las metodologías presentadas radica en el sistema de ecuaciones propuesto, diseñado para modelar únicamente celdas o paneles solares. En muchas ocasiones, no se consideran las variaciones de temperatura (T) y potencia radiante (G), así como el número de celdas que conforman el panel (N_s).

Tal como se presenta en la parte final de este capítulo, en las tablas 2.1 y 2.2, se presentan las ventajas y desventajas de cada modelo y método implementado para la extracción de parámetros de los dispositivos solares.

Por tanto, se propone implementar el modelo diodo único (SDM) y un método iterativo, en la búsqueda de mejoras al método para el trazo de la curva I-V simulada, y verificar la influencia de cada parámetro que describe al SDM, con el fin de detectar aquellos que generan mayor influencia en los cálculos. Esto contribuirá al diseño de una metodología capaz de simular tanto celdas como paneles solares, teniendo en cuenta las variaciones de temperatura y potencia radiante.

Capítulo 3. Proceso de fabricación de celdas solares de estructura simple.

En este capítulo se tratará el proceso de la fabricación de las celdas solares que fueron caracterizadas e este trabajo. A para ello, se describirá a groso modo el proceso de fabricación propuesto en la ref. [9].

3.1. Celdas solares de estructura simple.

Las celdas solares de estructura simple (figura 3.1) constan básicamente de un emisor formado por un material semiconductor, una capa antirreflejante generalmente de SiO_2 , contactos metálicos superiores y el contacto metálico inferior. El proceso de fabricación detallado se presenta en [9].

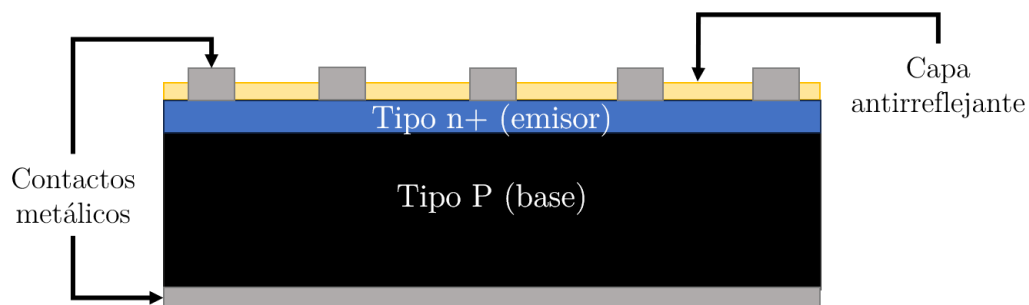


Figura 3.1. Celda solar de estructura simple [9].

Las celdas solares fueron fabricadas utilizando un sustrato de silicio cristalino tipo p dopado con boro y una resistividad de 5-15 Ωcm . Estas celdas tienen un espesor de 300 μm (el grosor de la oblea de silicio base) obtenidas mediante el método de crecimiento Czochralski (CZ) con una orientación (100) [9].

En el proceso de formación del emisor, la muestra se introduce a un horno de oxidación húmeda, utilizando gases de fósforo (PH_3), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2). De acuerdo con el proceso, para la redifusión de impurezas, las muestras se colocan nuevamente en el horno de oxidación húmeda, lo cual genera una película delgada de SiO_2 en la superficie del sustrato debido a la presencia de vapor de agua en el ambiente. Esta película se utilizó como una capa antirreflejante en las celdas solares, teniendo un espesor de 0.2 μm [9]

Para la formación de los contactos metálicos superiores, se empleó la mascarilla representada en la Figura 3.2. Esta máscara se utilizó para grabar las ventanas a través del SiO_2 mediante litografía. Posteriormente, se realizó el depósito de 0.5 μm de aluminio mediante la técnica de e-beam. En cuanto a los contactos inferiores, estos se obtuvieron mediante la evaporación de 1 μm de Al. Para finalizar el proceso de fabricación, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico (aleación) a 420 $^\circ\text{C}$ durante 20 minutos [9].

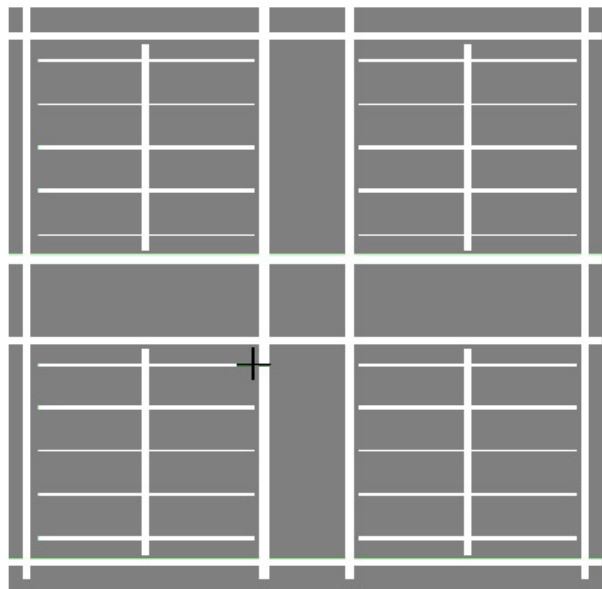


Figura 3.2. Mascarilla de la rejilla superior, para la formación de los contactos metálicos [9,61].

Como se ilustra en la Figura 3.2, la máscara empleada en la formación de los contactos superiores está compuesta por cuatro celdas de 1 cm x 1 cm, con el fin de aprovechar una mayor área del sustrato durante el proceso de fabricación. Una vez finalizado dicho proceso, las celdas son cortadas. En la Figura 3.3, se muestra la geometría de los dedos y la barra colectora de cada celda individual.

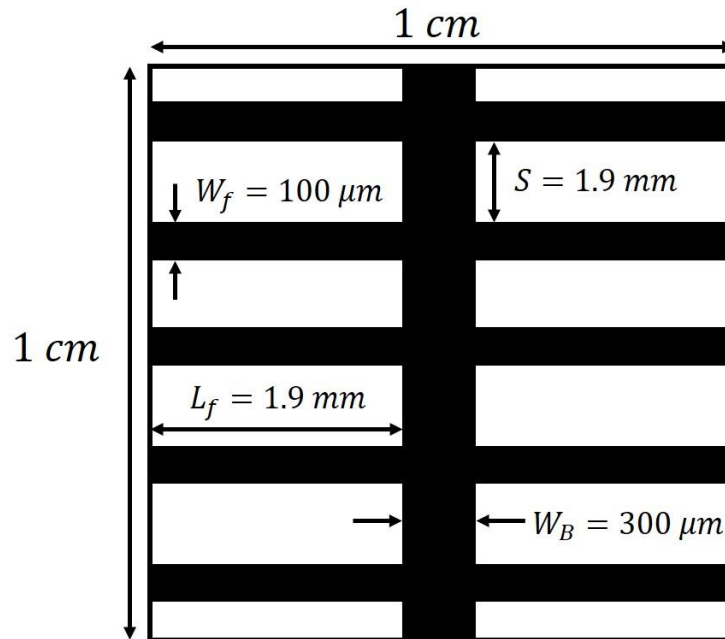


Figura 3.3. Geometría de la rejilla de contacto para celda de 1 cm² [62].

3.1.1. Caracterización eléctrica.

Una vez fabricadas las celdas solares, se lleva a cabo su caracterización. Este proceso es fundamental para validar y retroalimentar el proceso de fabricación de las celdas. Un método común de caracterización implica la obtención de la curva Corriente (I) – Voltaje (V), la cual constituye la caracterización principal que proporciona información sobre la eficiencia de conversión fotovoltaica. Además, posibilita el cálculo del factor de llenado del diodo, el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito [63].

Para la obtención de la curva I-V, se hace uso de un emulador solar, el cual es un instrumento de medición diseñado para replicar la radiación solar, proporcionando un amplio espectro semejante al del sol, abarcando desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). Estos equipos simulan el espectro solar AM1.5, cuyo estándar ha sido establecido por la American Society for Testing and Materials en la norma ASTM-

G173-03 (ASTM, 2003) [64] [65], y representa el promedio de la intensidad medida sobre 48 estados de EE. UU. durante un año [66].

Las Figuras (3.4) y (3.5) ilustran el emulador y la fuente utilizados en el laboratorio de celdas solares en el INAOE para realizar la caracterización eléctrica.

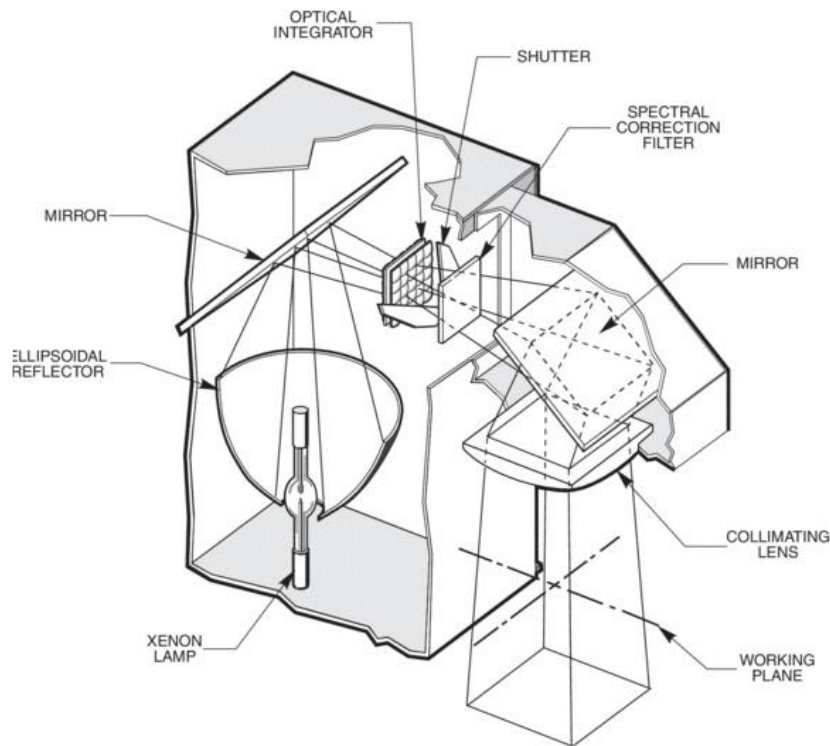


Figura 3.4. Emulador solar *Oriel Newport* [66].

El emulador solar, a través de un programa en LabVIEW, permite generar las curvas I-V de las celdas solares y extraer sus parámetros principales. El sistema completo se muestra en la Figura 3.5.

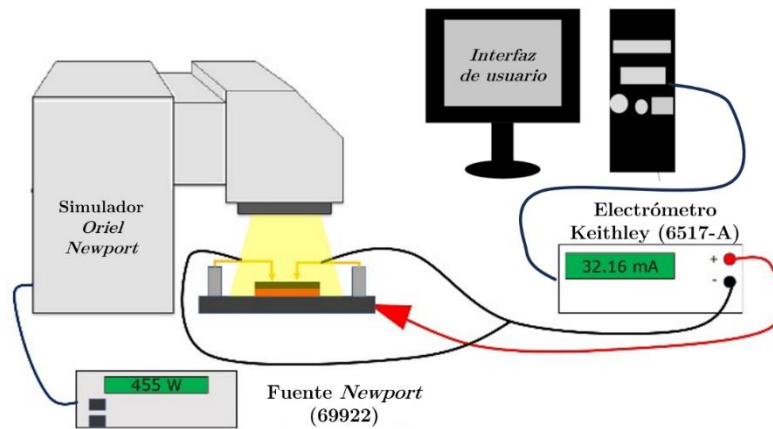


Figura 3.5. Equipos usados en la caracterización eléctrica [9,63].

La caracterización eléctrica de los dispositivos fabricados se realizó en condiciones estándar de iluminación AM1.5 (100 mW/cm^2) utilizando el simulador solar *Oriel Newport SOL-2A* en las instalaciones del INAOE.

3.1.2. Principales parámetros de desempeño.

En la Figura 3.6, se presentan las curvas I-V características de una celda solar ideal. La curva (a) corresponde al diodo y representa la medición de la celda solar en condiciones de oscuridad, mientras que la curva (b) corresponde a la celda solar bajo iluminación [63].

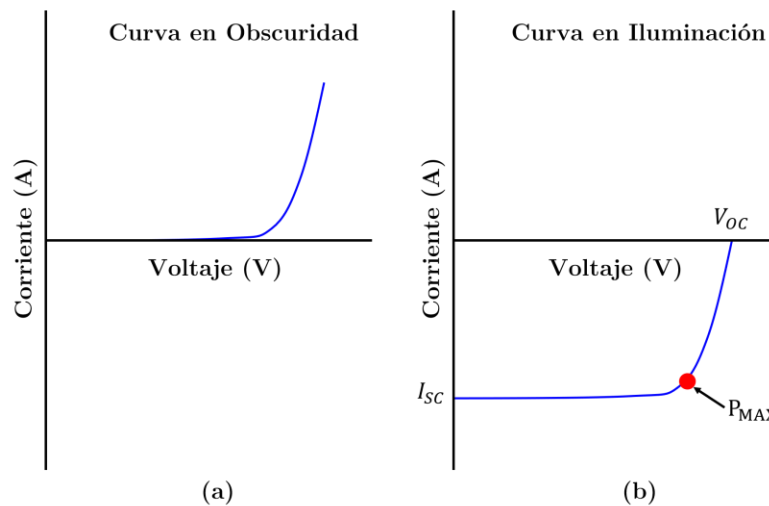


Figura 3.6. Curva característica de una celda solar: (a) en oscuridad y (b) en iluminación.

Al obtener la curva I-V de una celda solar, operando bajo condiciones estándar (STC, radiación AM1.5 = 1000 W/m², y temperatura T_{STC} = 25 °C), permite la determinación de los parámetros esenciales de la celda mediante esta representación gráfica [63].

La *corriente de cortocircuito* (I_{SC}) representa el valor máximo de corriente que el dispositivo puede generar como fuente de energía, alcanzándose cuando V = 0 [26]:

$$I_{SC} = I(V = 0) \approx I_{PV} \quad (3.1)$$

El *voltaje de circuito abierto* (V_{OC}) representa el máximo voltaje alcanzado por la celda cuando sus terminales están abiertos. Este valor se determina en el punto en el que la curva característica I-V de la celda solar bajo iluminación interseca el eje de voltaje (V), es decir, cuando I_{SC} es igual a cero (I_{SC} = 0). El cálculo de VOC se puede realizar mediante la siguiente expresión [26]:

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{PV}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.2)$$

El *punto de máxima potencia* (P_{MAX}) se refiere a la potencia máxima suministrada por la celda a la carga, determinada por el producto P = V x I. En este caso, se define mediante los valores V_{MP} e I_{MP}, que representan el voltaje y la corriente en dicho punto, los cuales no guardan relación con el V_{OC} o I_{SC}. Por lo tanto, se define como [26]:

$$P_{MAX} = V_M I_M \quad (3.3)$$

El *factor de llenado* (**FF**) establece una relación entre los tres puntos mencionados anteriormente: P_{MAX}, V_{OC} e I_{SC}. Este factor, generalmente, tiene un valor inferior a la unidad, ya que refleja las pérdidas asociadas al dispositivo (celda solar). Una celda de alta calidad presentaría un FF >0.70, y su expresión se define de la siguiente forma [26]:

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{SC}} \quad (3.4)$$

La *eficiencia de conversión de energía* (η) se expresa, comúnmente, en forma de porcentaje y es el parámetro más relevante de la celda, ya que define la cantidad de

conversión de luz (P_{LUZ}) que el dispositivo puede generar. Su definición es la siguiente [26]:

$$\eta = \frac{V_M I_M}{P_{LUZ}} = \frac{FF J_{SC} V_{OC}}{P_{LUZ}} \quad (3.5)$$

En términos generales, la eficiencia de la conversión de energía fotovoltaica es considerablemente limitada por restricciones físicas [10,67].

3.1.3. Influencia de la profundidad de unión (x_j) en la eficiencia.

La representación esquemática de la sección transversal de una celda solar, se presenta en la Figura 3.7. La base, que es el material inicial para una celda, generalmente tiene dopado tipo p .

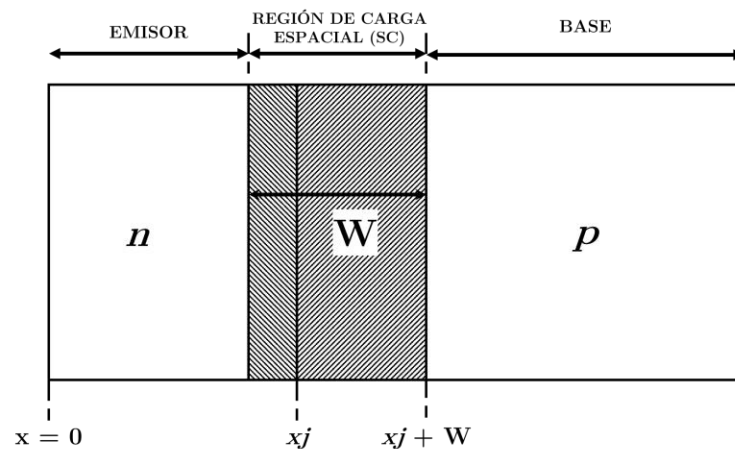
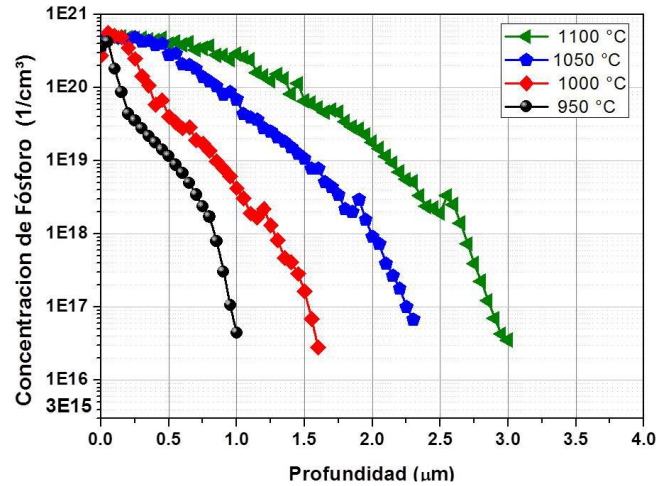


Figura 3.7. Esquema de la sección transversal de una celda solar [10,26].

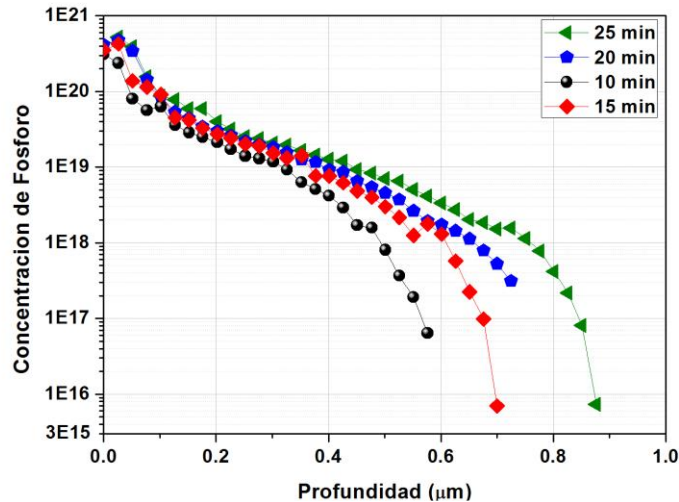
La región dopada con donadores tipo n se conoce como el emisor, un término tomado de la física de los transistores. Esta región está dopada con una concentración significativamente mayor que la base, por varias órdenes de magnitud. En consecuencia, la unión $p-n$ presenta un dopado asimétrico. La región de carga espacial, de un ancho W , se extiende principalmente hacia la región p . El punto x_j indica la profundidad de la unión $p-n$ [9,67].

Para la formación del emisor, se requiere llevar a cabo un proceso que consta de predeposición y redifusión de átomos dopantes sobre el sustrato [9, 67, 68]. Durante estas etapas, la temperatura y el tiempo son parámetros críticos para controlar x_j [68]. En

las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran gráficos que representan la influencia de la temperatura y el tiempo, respectivamente, en la profundidad de la unión. Estas representaciones son comúnmente conocidas como perfiles de dopado [9, 10,67,68,69].



3.8. Perfil de dopado del emisor mostrando la profundidad de unión (x_j) de acuerdo a la temperatura de difusión. [9].



3.9. Perfil de dopado del emisor mostrando la profundidad de unión (x_j) de acuerdo al tiempo de difusión. la influencia del tiempo en (x_j) [9].

Como se muestra en las Figuras 3.8 y 3.9, la concentración del dopante disminuye conforme se adentra en el sustrato, hasta alcanzar un mínimo donde se alcanza x_j . En esta zona es donde la concentración de los átomos dopantes (N_D) se igualan con la concentración del sustrato (N_A) [70].

3.1.4. Cálculo de la profundidad de unión.

De acuerdo con la teoría de difusión [71], al resolver la ecuación diferencial de segundo orden (Ec. 3.6) y considerando las condiciones de contorno que indican que Q es la dosis de dopante, la segunda ley de Fick se puede expresar mediante la ecuación 3.6 [70,72].

$$\frac{dC(x, t)}{dt} = D \frac{d^2C(x, t)}{dx^2} \quad (3.6)$$

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2} \quad (3.7)$$

Donde D es el coeficiente de difusión y t es el tiempo de depósito. El coeficiente de difusión depende directamente de la temperatura [73], por lo que, en la concentración intrínseca del silicio (n_i), también se debe considerar la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso [73,74].

Para una concentración extrínseca (N_D o $N_A > n_{i \text{ substrato}}$) el coeficiente de difusión está definido por la ecuación 3.8 [73]:

$$D = D^0 + D^- * \left(\frac{n}{n_i}\right) + D^= * \left(\frac{n}{n_i}\right)^2 \quad (3.8)$$

Donde cada uno de los términos D^* se debe expresar como [73]

$$D_0 \exp\left(\frac{-E_A}{k * T}\right) \quad (3.9)$$

Los términos D_0 y E_A se presentan en la Tabla 3.1 [73]

Tabla 3.1.
Coeficientes D_0 (cm^2/s) y E_A (eV) para difusión de fósforo [73].

Coeficiente	Valor
D^0	3.85
E_A	3.66
D^-	4.44
E_A	4.0
$D^=$	44.2
E_A	4.37

Teniendo definido el coeficiente de difusión, x_j puede calcularse como:

$$x_j = \sqrt{4Dt * \ln\left(\frac{Q}{N_A \sqrt{\pi Dt}}\right)} \quad (3.10)$$

Es esencial tener en cuenta que el proceso de difusión consta de dos etapas, pre-depósito y re-difusión, por lo tanto, es necesario considerar las temperaturas y los tiempos asociados con cada una de estas etapas. También se debe considerar que, al modificar x_j también se verán afectados otros parámetros, como, por ejemplo, la resistencia de hoja R_{SH} . Como se mostrará en la siguiente sección.

3.1.5. Estimación teórica de la resistencia de hoja (R_{SH}).

La resistencia de hoja o superficial (R_{SH}), es una propiedad eléctrica crucial, que se emplea para la caracterización de películas de materiales semiconductores y conductores. Esta medida representa la resistencia por unidad de área de una película con grosor uniforme y cuantifica la capacidad de carga eléctrica para moverse en el plano de la película [75].

La R_{SH} de películas uniformemente dopadas se determina mediante la siguiente relación:

$$R_{SH} = \frac{\rho}{t} = \frac{1}{\sigma t} \quad (3.11)$$

Donde:

t = espesor de la muestra

ρ = resistividad del material

σ = conductividad del material

Para substratos no uniformemente dopados R_{SH} , puede determinarse mediante la ec. 3.12:

$$R_{SH} = \frac{1}{q \int_0^{x_j} \mu_n C(x) dx} \quad (3.12)$$

Donde se tiene que:

q = carga del electrón

x_j = profundidad de unión del emisor

μ_n = movilidad del electrón

$C(x)$ = perfil de concentración.

3.2. Pérdida de eficiencia debido a efectos eléctricos.

La eficiencia es el parámetro principal en los dispositivos solares, dependiente del proceso de fabricación. Para garantizar una celda solar de alta calidad, es crucial minimizar cualquier pérdida potencial. La figura 3.11 proporciona un diagrama en el que se indican las diversas pérdidas posibles en las celdas solares, clasificadas generalmente en dos categorías principales: ópticas y eléctricas.

De acuerdo con la Figura 3.10, las pérdidas eléctricas pueden ser tanto óhmicas, asociadas a la resistencia en serie (R_s), como por recombinación, relacionadas con la resistencia en paralelo (R_p), de acuerdo con los modelos presentados en el capítulo 2.

Estas resistencias tienen un impacto significativo y degradable en la eficiencia de las celdas solares, ya que disipan energía en forma de calor. En la mayoría de los casos, la consecuencia principal de estas resistencias parásitas es la reducción del factor de llenado y, en consecuencia, de la eficiencia de la celda solar [75].

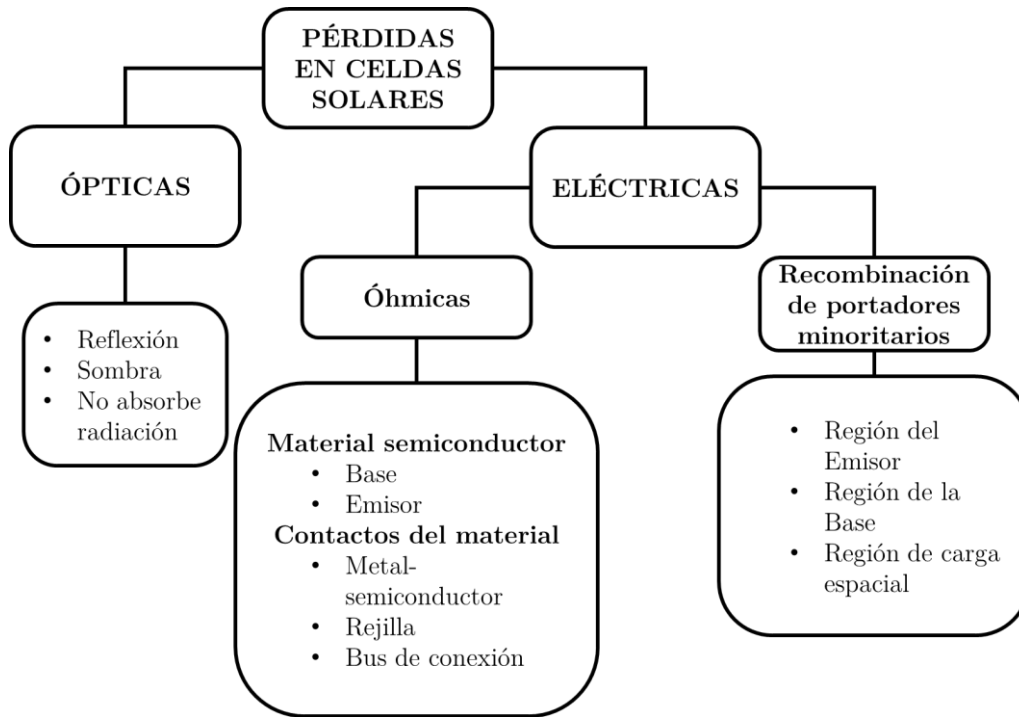


Figura 3.10. Diagrama de pérdidas que pueden reducir la eficiencia en celdas solares [76].

En la Figura 3.11, se puede observar el efecto de cada una de estas resistencias. En la figura 3.11 (a) se tienen presentes valores altos de R_s , idealmente esta resistencia debe tender a cero ($R_s \rightarrow 0$).

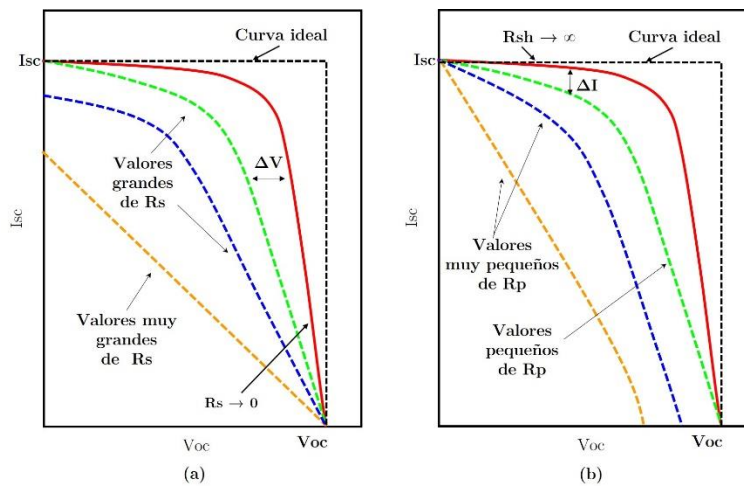


Figura 3.11. Influencia de las pérdidas eléctricas en celdas solares, a) pérdidas óhmicas (R_s), b) pérdidas por recombinación (R_p) [74].

Por otro lado, en la Figura 3.11 (b), se muestra que tener valores pequeños de resistencia en derivación (o en paralelo) también provoca la deformación de la curva I-V, ya que idealmente, esta resistencia debería ser lo más grande posible, tendiendo hacia el infinito ($R_p \rightarrow \infty$) [67, 74, 76].

3.2.1. Pérdidas por recombinación (R_p).

La magnitud de esta resistencia se encuentra influenciada por las corrientes de fuga a lo largo de los bordes de la celda solar. Los defectos puntuales en la unión p-n también pueden generar una resistencia de derivación baja. Estos defectos pueden ser interrupciones en la unión p-n, originadas durante la difusión del emisor n , donde partículas de impurezas obstaculizan la difusión en puntos específicos, dando lugar a cortocircuitos, aunque sean de pequeña magnitud [10,26].

3.2.2. Pérdidas óhmicas (R_s).

Las pérdidas relacionadas con esta resistencia están vinculadas a los materiales y la geometría de los contactos metálicos y metal-semiconductor. En términos generales, se puede afirmar que esta resistencia tiene los siguientes componentes [26,67]:

- La resistencia de contacto de metal-semiconductor
- Resistencia de los contactos metálicos
- Resistencia del material semiconductor

3.2.2.1. Componentes de la resistencia en serie (R_s).

La Figura 3.12 ilustra mejor cada uno de los componentes de la resistencia en serie [26].

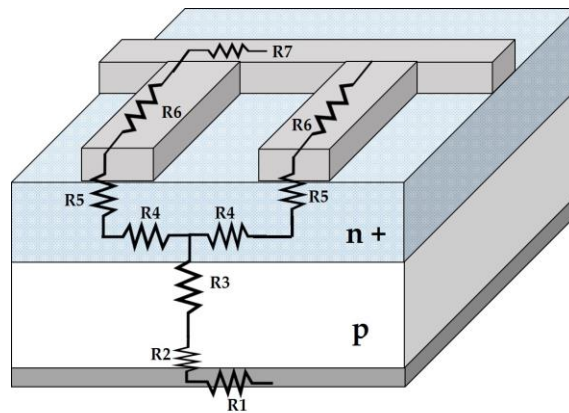


Figura 3.12. Componentes de la resistencia en serie [26].

Cada una de los componentes resistivos mostrados en la Figura 3.12 se describen a continuación y pueden ser calculadas por las ecuaciones presentadas en la tabla 3.2.

- R1** Contacto metálico posterior.
- R2** El contacto metal-semiconductor en toda la superficie posterior
- R3** El material semiconductor (base)
- R4** El emisor entre los dedos de la rejilla
- R5** El contacto metal semiconductor entre los dedos de la rejilla
- R6** El dedo de la rejilla
- R7** La barra colectora (Busbar)

Tabla 3.2.

Ecuaciones de para cálculo el de cada componente de R_s [26].

Componente de R_s	Ecuación
R1	$R_1 = \frac{1}{6} \rho_{met} \frac{L_{BC}}{t_{met} W_{BC}}$
R2	$R_2 = \frac{\sqrt{R_{SHSUB} \rho_{CSUB}}}{L_{BC}} \coth \left(W_{BC} \sqrt{\frac{R_{SHSUB}}{\rho_{CSUB}}} \right)$
R3	$R_3 = \rho_{SUB} * t_{PR} * A_{CELL}$
R4	$R_4 = \frac{R_{SHE} S}{L_f 6}$
R5	$R_5 = \frac{\sqrt{R_{SHE} \rho_{CE}}}{L_f} \coth \left(W_f \sqrt{\frac{R_{SHE}}{\rho_{CE}}} \right)$
R6	$R_6 = \frac{1}{3} \rho_{met} \frac{L_B}{t_m W_B}$
R7	$R_7 = \frac{1}{6} \rho_{met} \frac{W_f}{t_m W_f}$

Para calcular la resistividad del substrato (ρ_{SUB}) y la resistividad del emisor (ρ_{CE}), es esencial tener en cuenta la altura de la barrera de potencial generada por el contacto entre el metal y el semiconductor, considerando si es de tipo n o tipo p . Para el caso de tipo n , se tiene [26]

$$q\varphi_{Bn} = q[\Phi_m - \chi_s] \quad (3.13)$$

Para el contacto tipo p , la ecuación es la siguiente:

$$q\varphi_{Bp} = E_g - q[\Phi_m - \chi_s] \quad (3.14)$$

Donde

$q\varphi_{Bn}, q\varphi_{Bp}$	Altura de la barrera metal-semiconductor.
$q\varphi_m$	Función de trabajo del metal.
$q\chi_s$	Función de trabajo del semiconductor.
E_g	Bandgap del semiconductor.

Una vez que se ha calculado la altura de la barrera, es posible determinar la resistividad específica del contacto. Esta resistividad se ve influenciada por el movimiento de los electrones entre el metal y el semiconductor. Este movimiento puede ocurrir a través del efecto túnel o del efecto termoiónico, de acuerdo a el nivel de dopado del semiconductor [75,77].

Así, para el efecto túnel, se expresa como:

$$\rho_c = \frac{k}{qTA^*} e^{\left(\frac{\varphi_{Bn} 4\pi\sqrt{\epsilon_{Si}m^*}}{h\sqrt{N_D}}\right)} \quad (3.15)$$

Donde

A^* = constante de Richardson ($1.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2\text{K}^2$)

m^* = masa del electrón en reposo.

Para el efecto termoiónico

$$\rho_c = \frac{k}{qTA^*} e^{\left(\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right)} \quad (3.16)$$

Donde

k = constante de Boltzmann

q = carga del electrón

T = temperatura en K.

3.3 Conclusiones.

En este capítulo, se presentó la estructura de una celda solar elemental, la cual constituye uno de los enfoques centrales de estudio, en los objetivos de esta investigación. Asimismo, se han detallado los indicadores de desempeño que ofrecen una visión general de los dispositivos solares, destacando la eficiencia de conversión de energía (η) como el factor determinante para evaluar la calidad de la celda solar.

La eficiencia de la celda solar puede verse afectada por diversos factores, los cuales engloban, desde la profundidad de la unión (x_j), que modifica la resistencia superficial (R_{SH}), hasta las resistencias parásitas (R_p y R_s), que derivan de la correlación física originada por las diversas uniones entre materiales, así como por la configuración geométrica. En consecuencia, resultará de vital importancia investigar aquellos parámetros que ejerzan un impacto más significativo en la eficiencia final de la celda solar, de acuerdo a la curva característica (I-V), con el propósito de mejorar los procesos de fabricación y la estructura del dispositivo.

Capítulo 4. Análisis de parámetros característicos de SDM aplicando Newton-Raphson.

Dadas las problemáticas identificadas durante la revisión del estado del arte en el capítulo 2, este capítulo presenta un análisis detallado del método iterativo de extracción de parámetros basado en Newton-Raphson aplicado al modelo de diodo único (SDM).

4.1. Implementación del metodo de Newton-Raphson para la extracción de parámetros.

El primer paso para llevar a cabo la extracción de parámetros es la selección del modelo. En este trabajo de tesis se opta, por el modelo de diodo único (SDM) debido a la cantidad de parámetros que lo definen y la buena aproximación para representar la tecnología de silicio [78].

Para solucionar la ecuación que describe al SDM, se decide implementar el método de Newton-Raphson [79], dada su fácil aplicación y buena aproximación en la búsqueda de soluciones [23], su implementación sirve para comprender los alcances y limitaciones de este método y con ello proponer mejoras que amplíen la aplicación de este método, ya que de el método implementado depende la aproximación con un mínimo de error (error < 1%) del modelo a la curva experimental.

En la figura 4.1, se presenta un diagrama de bloques general que ilustra el funcionamiento del método Newton-Raphson.

Como se observa en el diagrama de la figura 4.1, el método Newton-Raphson, al igual que la mayoría de los métodos, se basa en la hoja de datos del fabricante, de la cual se extrae determinada información para formular el sistema de ecuaciones 2.8 a 2.10 del capítulo 2.

Estas ecuaciones generalmente incluyen I_{SC} , V_{OC} , $P_{MAX, FAB}$, T_{STC} y G_{STC} . Las cuales caracterizan a los dispositivos fotovoltaicos (celdas/paneles solares).

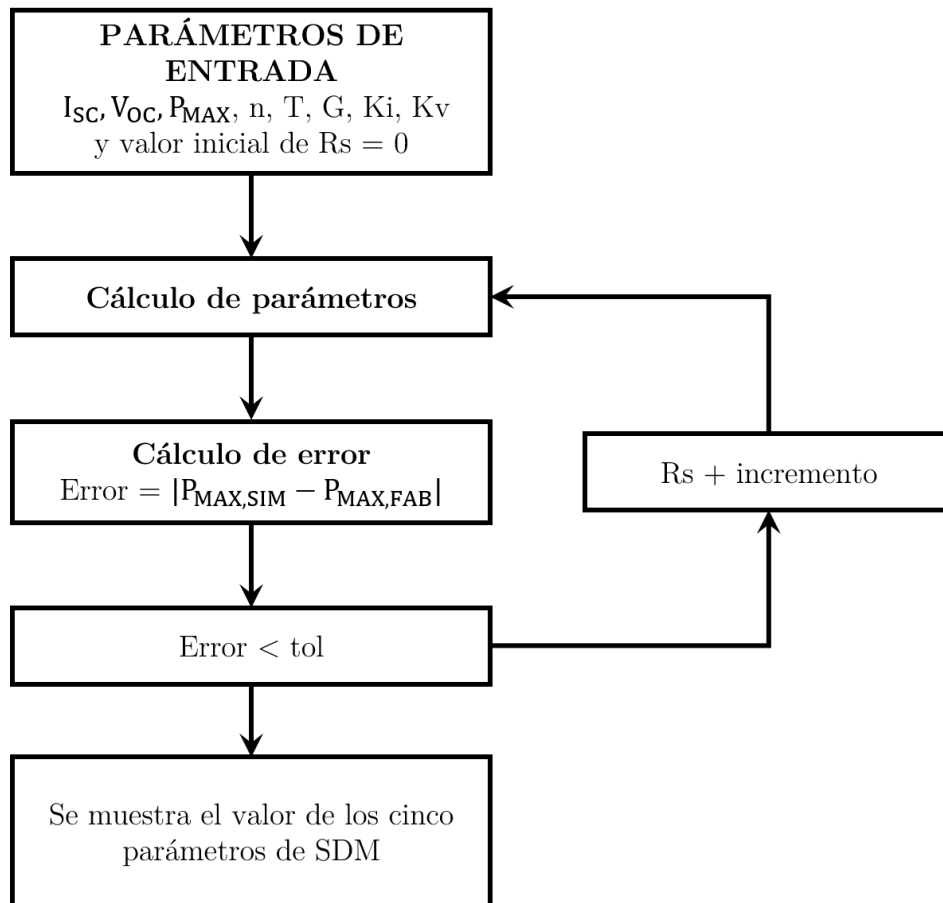


Figura 4.1. Diagrama a bloques del funcionamiento del método Newton-Raphson, para la extracción de parámetros de SDM [23].

Algunos autores proponen la ecuación (4.1.) para el cálculo de I_{PV} considerando variaciones de temperatura (T) y potencia radiante (G).

$$I_{PV} = (I_{PV, STC} + K_i * (T - T_{STC})) \frac{G}{G_{STC}} \quad (4.1)$$

De la hoja de datos se toman los valores de I_{SC} y K_i para ser usados en la ecuación (4.1) tomando en cuenta que $I_{PV,STC} \approx I_{SC}$, al igual que se considera el coeficiente de corriente dependiente de temperatura (K_i), que se proporciona en la hoja de datos.

Para el cálculo de I_o , considerando las variaciones de T , Villalba et. al. {23} propone la siguiente ecuación

$$I_o = \frac{I_{SC,STC} + K_i(T - T_{STC})}{\exp\left(\left(V_{OC,STC} + \frac{K_v(T - T_{STC})}{aVt}\right) - 1\right)} \quad (4.2)$$

En la ecuación (4.2), se introduce el coeficiente de voltaje dependiente de la temperatura (K_v) y se realiza una simplificación al modelo SDM, excluyendo R_s y R_p , asumiendo así un modelo de celda/panel solar ideal.

Para el cálculo de R_p se usan las ecuaciones (4.3) y (4.4.) [40]

$$R_{PO} = \frac{V_{MP}}{I_{SC,STC} - I_{MP}} - \frac{V_{OC,STC} - V_{MP}}{I_{MP}} \quad (4.3)$$

$$R_p = \frac{V_{MP}(V_{MP} + I_{MP}R_s)}{V_{MP}I_{PV} - V_{MP}I_o \exp\left[\frac{(V_{MP} + I_{MP}R_s)q}{N_s n kT}\right] + V_{MP}I_o - P_{MAX,SIM}} \quad (4.4)$$

Donde R_{po} es un valor inicial derivado del cálculo de la pendiente entre las coordenadas (V_{MP}, I_{MP}) de $P_{MAX,FAB}$ e I_{SC} y V_{OC} de acuerdo a la Ec. (4.3). Dejando a R_p como la variable dependiente de la Ec. (2.12), se obtiene la Ec. (4.4), donde $P_{MAX,SIM}$ se calcula a partir de la Ec. (2.9).

Como se ilustra en el diagrama de la figura 4.1, dos parámetros son fundamentales en el proceso iterativo del método Newton – Raphson: el incremento en el valor inicial de R_s , que será el punto de aproximación hasta alcanzar la solución óptima y la tolerancia de error (tol) que determina la diferencia entre $P_{MAX,FAB}$ y $P_{MAX,SIM}$. Este aspecto se explicará con más detalle en los apartados siguientes.

4.2. Influencia de los principales parámetros.

De acuerdo a la física que explica el funcionamiento de las celdas o paneles solares [8-10], las ecuaciones y parámetros utilizados en el modelado deben ser capaces de replicar con un margen de error mínimo las condiciones extremas en las que operan estos dispositivos.

Para el SDM, definido por su ecuación característica (Ec. 2.5), se identifican cinco parámetros (I_{PV} , I_0 , R_s , R_p y n) que influyen directamente en la representación gráfica de la curva simulada. Sin embargo, la temperatura (T) y la potencia radiante (G), factores ambientales bajo los cuales el dispositivo fotovoltaico opera, también ejercen una influencia indirecta sobre la curva resultante del modelo. Esta interacción complica el proceso de simulación y modelado, afectando, por ende, la eficiencia de la celda solar.

En consecuencia, la formulación del sistema de ecuaciones debe considerar de manera precisa estos efectos "anidados", buscando reproducir de manera cercana las curvas experimentales obtenidas mediante la caracterización en condiciones variables del entorno o por medio de experimentación en laboratorio.

4.2.1. Temperatura (T).

Debido a que la celda solar se fabrica con materiales semiconductores, la temperatura ejerce una influencia significativa en su desempeño [24-26]. En la práctica, es común que la celda solar alcance temperaturas de hasta 60-65 °C [82,83]. Con el objetivo de estudiar los efectos de este parámetro en la curva I-V, específicamente en el panel comercial KYOCERA KC200GT, uno de los más estudiados [78], se ha desarrollado en la presente tesis una herramienta de software en Matlab (ver Figura 4.2).

Esta herramienta se basa en el diagrama presentado en la Figura 4.1 y permite analizar de manera detallada los impactos de la temperatura en el comportamiento de la curva I-V de la celda solar.

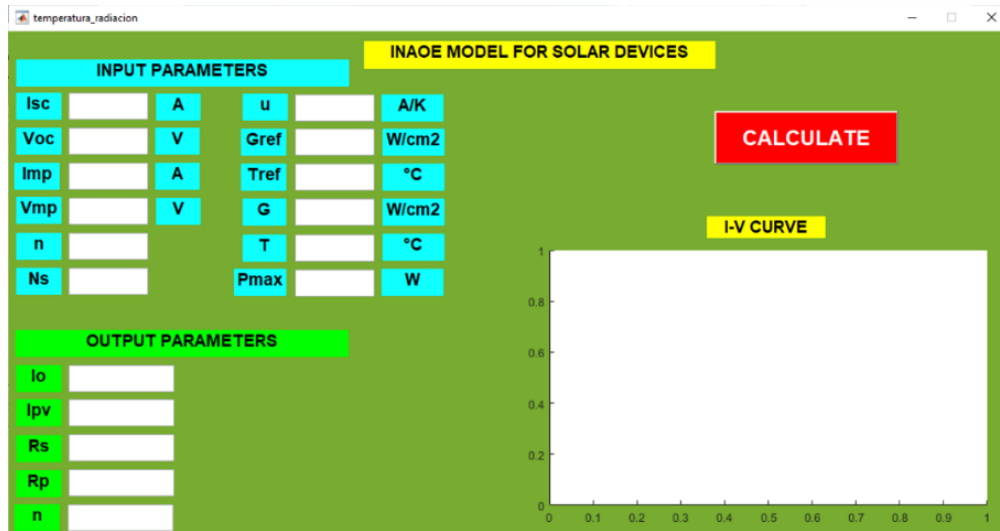


Figura 4.2. Herramienta de software programada en Matlab, para la extracción de parámetros.

Los parámetros de entrada proporcionados por el fabricante en condiciones estándar (STC), se presentan en la Tabla 4.1 [84].

Tabla 4.1
Parámetros de entrada presentados de la hoja de datos del panel solar KC200GT en STC [84].

Parámetro	Valor	Unidades
P_{MAX}	200 (+10% / -5%)	W
I_{SC}	8.21	A
V_{OC}	32.9	V
V_{MPP}	26.3	V
I_{MPP}	7.61	A
K_V	-1.23×10^{-1}	V/°C
K_i	3.18×10^{-3}	A/°C

La Figura 4.3 presenta la curva I-V proporcionada por el fabricante en la hoja de datos, a temperaturas de 25 °C, 50 °C y 75 °C.

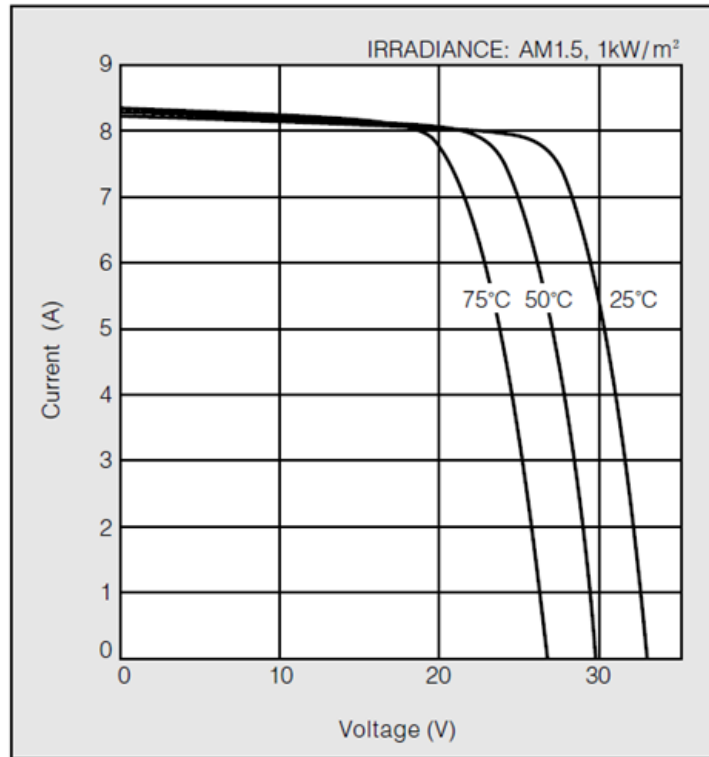


Figura 4.3. Curva I-V del panel KC200GT, a 25 °C, 50 °C y 75 °C [84].

De acuerdo con la Figura 4.3, la potencia radiante (G) se mantiene constante a 1 kW/m² para cada variación de temperatura (ΔT). Se observa que a medida que la temperatura (T) aumenta, el V_{oc} experimenta modificaciones, de acuerdo con los principios de la teoría de semiconductores [24-26].

En la herramienta de software desarrollada (Figura 4.2), se ingresan los parámetros mostrados en la Tabla 4.1, junto con T y G en condiciones estándar de prueba (STC), con una tolerancia (tol) e incremento de 0.1. Esto resulta en la obtención de la curva simulada, mostrada en la Figura 4.4.

En la curva de la Figura 4.4, inicialmente se observa que tanto la I_{sc} como el V_{oc} son similares a los valores proporcionados por el fabricante. Sin embargo, al calcular la $P_{MAX,SIM}$ mediante la Ec. (2.12), se obtiene $P_{MAX,SIM} = 200.205$ W (Ver Tabla 4.2), lo que representa una potencia máxima superior a la indicada por el fabricante, afectando así otros parámetros de extracción y desempeño. En consecuencia, se decide ajustar el valor de la tolerancia de error (tol) y el incremento en R_s a 0.01, respectivamente. Se determina que estos parámetros tienen una influencia significativa en el proceso iterativo del método de extracción.

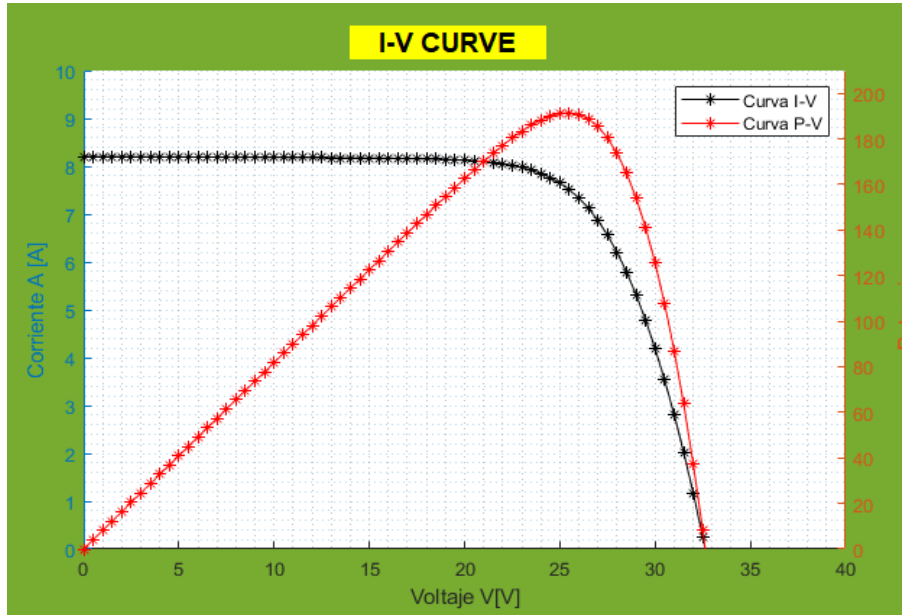


Figura 4.4. Curva simulada obtenida en STC.

Cabe recalcar, que al aplicar este método iterativo (Newton-Raphson), no es posible hacer una comparación con curvas del fabricante, ya que no se cuenta con el software y datos experimentales para llevarlo a cabo.

Tabla 4.2.
Influencia de tol e incremento en $P_{MAX,SIM}$

Parámetros		$P_{MAX,SIM}$ (W)	$P_{MAX,FAB}$ (W)	Diff (%)
tol	Incremento			
1 e-1	1 e-1	200.205	200.143	3.1 e-2
1 e-2	1 e-2	200.145	200.143	9.9 e-4
1e-3	1e-3	200.143	200.143	1e-4
1e-4	1e-4	200.143	200.143	1e-6

De acuerdo con la Tabla 4.2, al reducir la tolerancia de error (tol) y el incremento en R_s , se observa que $P_{MAX,SIM}$ tiende a converger hacia $P_{MAX,FAB}$. Sin embargo, al intentar ajustar la temperatura (T) a una condición fuera de STC, el método experimenta una

"falla", quedando atrapado en un mínimo local y no logra encontrar la solución al sistema de ecuaciones.

Este fenómeno conduce a una conclusión parcial del análisis, evidenciando la necesidad de encontrar un equilibrio entre la precisión deseada y las condiciones de temperatura en las cuales se busca extraer los parámetros [85].

4.2.2. Potencia radiante (G).

De acuerdo con la Ec. (2.2), la potencia radiante (G) afecta directamente a I_{PV} en una celda solar. En una celda solar ideal, se cumple que I_{SC} es igual a I_{PV} ; sin embargo, debido a las pérdidas asociadas a la unión de los materiales $p-n$ y a R_s y R_p , la I_{PV} se verá reducida en mayor o menor medida, dependiendo de la calidad del proceso de fabricación [85]. Por consiguiente, la cantidad de potencia radiante bajo la cual se encuentra la celda o panel solar afectará indirectamente a I_{SC} .

En la Figura 4.5, se presentan las curvas proporcionadas por el fabricante para diferentes valores de potencia radiante (G).

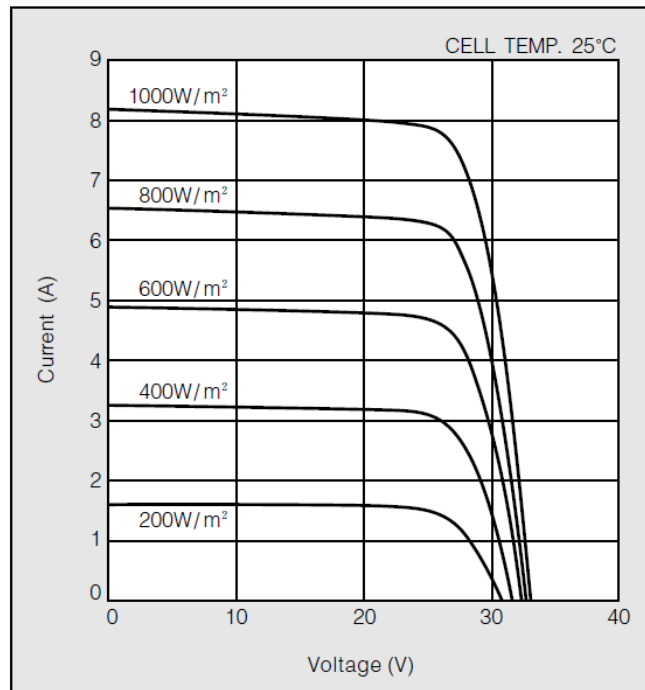


Figura 4.5. panel KC200 GT bajo diferentes condiciones de potencia radiante [84].

En la Figura 4.5, se muestra exclusivamente la variación de la potencia radiante (G), ya que la temperatura (T) se mantiene a 25 °C, para cada variación de G.

En la Tabla 4.3 se muestra como el valor de I_{PV} varía en función de los valores de la tolerancia y su incremento. Lo que, por ende, influye en los demás parámetros de extracción.

Tabla 4.3.
Influencia de *tol* e *incremento* en $I_{PV,SIM}$

Parámetros		$I_{PV,SIM}$ (A)	$I_{PV,FAB}$ (A)	Diff (%)
Tol	Incremento			
1 e-1	1 e-1	8.2184	8.21	10.22 e-2
1 e-2	1 e-2	8.2158	8.21	7.05 e-2
1e-3	1e-3	8.2138	8.21	4.62 e-2
1e-4	1e-4	8.2134	8.21	4.13 e-2

Como se detalló anteriormente, al mejorar la precisión del método, se entra en un ciclo iterativo donde no se logra encontrar una solución. Como resultado, se llega a la conclusión parcial de que las variaciones en la potencia radiante deben ser obtenidas a través de otros métodos o enfoques.

4.2.3. Corriente fotogenerada (I_{PV}).

La corriente fotogenerada (I_{PV}) se modela generalmente mediante la Ec. (2.2) y depende directamente de la potencia radiante incidente (G). Este factor afecta, en consecuencia, la corriente de cortocircuito (I_{SC}) proporcionada por el dispositivo, y su impacto se muestra en las curvas simuladas presentadas en la Figura 4.6.

Las curvas exhibidas en la Figura 4.6 destacan cómo el principal efecto de varias G recae en la I_{SC} , mientras que el voltaje de circuito abierto (V_{OC}) se ve ligeramente afectado para variaciones alrededor de G . En muchos casos, el efecto sobre este último parámetro de desempeño puede considerarse despreciable [83,85].

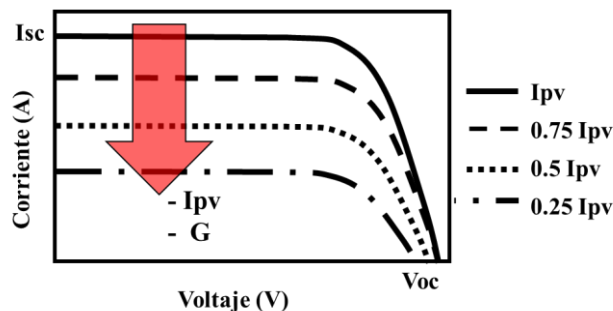


Figura 4.6. Influencia de I_{PV} , en la curva simulada [85].

4.2.4. Corriente de saturación inversa del diodo (I_0).

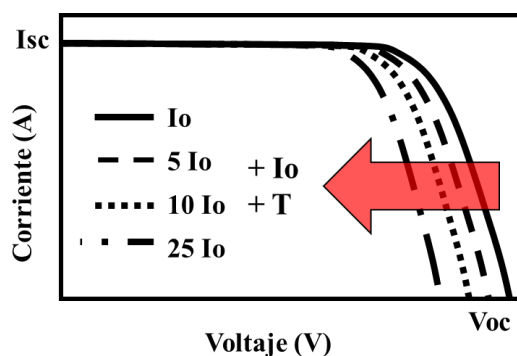
La corriente de saturación inversa del diodo es un parámetro que está sujeto a diversos factores determinados por el proceso de fabricación [25,26]. Los valores típicos de este parámetro suelen estar en el orden de los picoamperios (pA) [85]. Dado que el método iterativo no permite la manipulación directa de este parámetro, se llevó a cabo un análisis de su influencia a partir de valores propuestos en el parámetro I_0 , de acuerdo a la Ec. (3.2). Este análisis se realizó bajo condiciones estándar de prueba (STC), y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4.
Análisis de influencia de I_0 en V_{oc} .

I_0 (A)	V_{oc} (V)
1e-1	0.23
1e-2	0.29
1e-3	0.35
1e-6	0.52
1e-9	0.70
1e-12	0.87

En la tabla anterior, se observa que a medida que la corriente de saturación inversa del diodo (I_0) disminuye, el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) aumenta. Por esta razón, en los procesos de fabricación del diodo y las celdas solares, se busca que este parámetro sea lo más pequeño posible para minimizar su influencia en los parámetros de desempeño del dispositivo.

La Figura 4.7 ilustra gráficamente cómo influye la corriente de saturación inversa del diodo (I_0) en la curva I-V simulada para una celda o panel solar.



4.7. Influencia de I_0 , sobre la curva I-V simulada [85].

4.2.5. Factor de idealidad del diodo (n).

Uno de los parámetros que genera conflictos en el modelado y la extracción de parámetros es el factor de idealidad del diodo (n), considerado como un parámetro de ajuste [25,26-83]. Con el propósito de simplificar el sistema de ecuaciones y reducir el número de parámetros en la extracción, algunos autores sugieren asignar valores específicos a dicho parámetro.

En [84], se sugiere que n tome el valor de 1 y, en el caso de estudiar el modelo de doble diodo, se establezca que n_2 sea igual a 2. Por otro lado, en [23 y 86], se menciona que el valor de n se asigna de acuerdo al tipo de tecnología de la celda o panel solar, como se muestra en la tabla 4.5.

En [36], se examina el modelo de triple diodo (TDM) y se analiza la influencia del factor de idealidad (n), como se presenta en la Figura 4.8. Al asignar valores entre 1 y 2 para cada factor de idealidad del modelo de triple diodo, se observa que se afecta la $P_{MAX,SIM}$ y el V_{OC} . Por lo tanto, una determinación precisa de n resulta indispensable para garantizar la precisión del método de extracción.

Tabla 4.5
Factor de Idealidad de acuerdo al tipo de tecnología de la celda solar [23].

Tecnología	n
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
a-Si-H tándem	3.3
a-Si-H triple	5
CdTe	1.5
CTs	1.5
AsGa	1.3

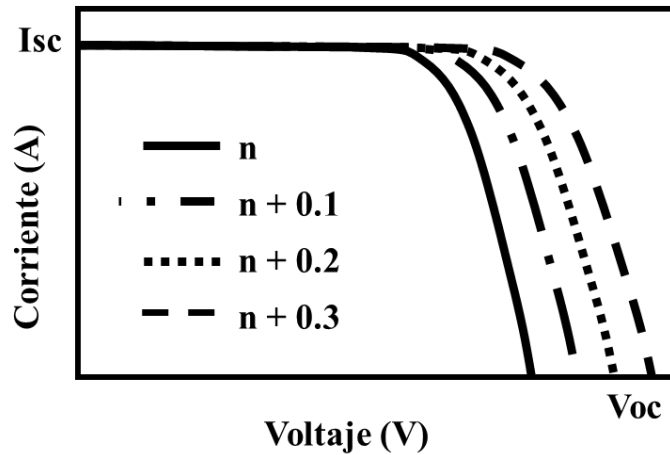


Figura 4.8. Influencia del factor de idealidad del diodo en la curva I-V simulada [36].

4.2.6. Resistencia en serie (R_s).

Otro de los parámetros que presenta desafíos en el modelado de celdas/paneles solares es determinar el valor de la resistencia en serie (R_s). Como se mostró en la Figura 3.12 (a), R_s se manifiesta en la rama de la curva de P_{MAX} a V_{OC} , por lo que idealmente se busca que R_s tienda a cero para minimizar sus efectos en la eficiencia del dispositivo solar.

En el método de Newton-Raphson, se le asigna un valor inicial a R_s de 0, y durante el proceso iterativo del método, su valor se incrementará conforme a la precisión o tolerancia de error (*tol*) que el investigador/diseñador desee. La Tabla 4.6 muestra cómo al modificar la tolerancia y el incremento en el valor de R_s , el cálculo de R_s se ve afectado significativamente, lo que a su vez influye en el trazado de la curva simulada.

Tabla 4.6.
Influencia de *tol* e *incremento* en $P_{MAX,SIM}$

Parámetros		R_s (Ω)	$P_{MAX,SIM}$ (W)	$P_{MAX,FAB}$ (W)	Diff (%)
tol	Incremento				
1 e-1	1 e-1	0.200	200.205	200.143	3.1 e-2
1 e-2	1 e-2	0.220	200.145	200.143	9.9 e-4
1e-3	1e-3	0.221	200.143	200.143	0
1e-4	1e-4	0.226	200.143	200.143	0

La tabla anterior muestra cómo la modificación de la precisión en la determinación de R_s afecta a $P_{MAX,SIM}$, lo que a su vez influye en el resto de los parámetros de la extracción. Sin embargo, mejorar la precisión de la aproximación conlleva un aumento en el tiempo de cálculo, como se muestra en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7.

Tiempo de cálculo de acuerdo a la variación de *tol* e *incremento*.

Parámetros		R_s (Ω)	$P_{MAX,SIM}$ (W)	$P_{MAX,FAB}$ (W)	Tiempo de cálculo
tol	Incremento				
1 e-1	1 e-1	0.200	200.205	200.143	1 s
1 e-2	1 e-2	0.220	200.145	200.143	1 s
1e-3	1e-3	0.221	200.143	200.143	1 s
1e-4	1e-4	0.226	200.143	200.143	2 s
1e-5	1e-5	0.227	200.143	200.143	2 min
1e-6	1e-6	0.227	200.143	200.143	10 min

4.2.7. Resistencia en paralelo (R_p).

El modelo SDM está definido por cinco parámetros característicos. Algunos autores [16-17] buscan simplificar el modelo omitiendo alguna de las resistencias o idealizándolas, como en el caso de $R_p \rightarrow \infty$. En el método de Newton-Raphson, la determinación de R_p se realiza al final, después de haber calculado los otros cuatro parámetros. No obstante, como se ha mencionado en los apartados previos, la precisión en la tolerancia (*tol*) y el incremento desempeñan un papel importante en el método aplicado, como se muestra en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8.

Influencia de *tol* e *incremento* en $P_{MAX,SIM}$

Parámetros		R_p (Ω)	$P_{MAX,SIM}$ (W)	$P_{MAX,FAB}$ (W)	Diff (%)
Tol	Incremento				
1 e-1	1 e-1	238.150	200.205	200.143	3.1 e-2
1 e-2	1 e-2	394.384	200.145	200.143	9.9 e-4
1e-3	1e-3	445.171	200.143	200.143	0
1e-4	1e-4	438.467	200.143	200.143	0
1e-5	1e-5	433.238	200.143	200.143	0
1e-6	1e-6	423.211	200.143	200.143	0

Al ser Rp el último parámetro calculado según el método propuesto, esto genera incertidumbre en la confiabilidad del cálculo realizado. Como se ha mostrado a lo largo de este capítulo, la influencia de los parámetros tiene un efecto "anidado", lo que implica que asignar valores ya establecidos a ciertos parámetros o prescindir de dichos parámetros influye en los resultados finales.

En la Tabla 4.9 se presenta una comparación con otros autores que han aplicado el método de Newton-Raphson para la extracción de parámetros. En esta tabla, se compara el método propuesto con dos autores que se basan en el SDM y aplican Newton-Raphson como método de extracción. Se observa una diferencia notable entre los valores obtenidos por cada método. Esta disparidad se debe a los valores asignados a la tolerancia (*tol*) y al incremento para llevar a cabo el proceso iterativo.

Tabla 4.9.
Extracción de parámetros aplicando Newton-Raphson.

Parámetros	[23]	Propuesto	Dif	[87]	Propuesto	Dif
Io	9.83e-08	9.83e-08	0%	9.83e-08	9.83e-08	0%
Ipv	8.214	8.21	0.04 %	8.215	8.21	0.05 %
N	1.3	1.3	0%	1.3	1.3	0%
Rs	0.221	0.227	-2.71%	0.23	0.21	8.7%
Rp	415.405	433.238	-4.29%	601.336	666.804	-10.9%

Para aproximar el método propuesto a los valores obtenidos por el autor [23], fue necesario ajustar la tolerancia a $1e-5$ e incrementarla a $1e-5$. A pesar de estos ajustes, no se logró una buena aproximación a lo reportado por este autor, ya que reducir la tolerancia de error influye en el tiempo de cálculo, lo que resulta en una considerable diferencia en los valores de Rs y Rp.

En el caso del autor [87], se realizaron ajustes nuevamente con valores de tolerancia de 0.001 e incremento de 0.01, logrando una mejor aproximación a los valores reportados por este autor. Sin embargo, el método propuesto aún no logra aproximarse con un mínimo de error a los valores de Rs y Rp reportados por este autor.

4.3. Conclusiones.

De acuerdo con el análisis realizado sobre el método de extracción basado en Newton-Raphson, se determinó que, al tratarse de un método iterativo, no es viable ajustar la

temperatura (T) y la potencia radiante (G) para condiciones fuera de las condiciones estándar de prueba (STC), ya que esto conduce a un bucle donde no se pueden hallar soluciones.

También se llega a la conclusión de que los valores de tolerancia (tol) e incremento son cruciales al aplicar Newton-Raphson para acercarse lo máximo posible a la $P_{MAX,FAB}$. Sin embargo, se observa que, al buscar la mejor aproximación, también se afecta el tiempo de cálculo debido al número de iteraciones. Una mala estimación de $P_{MAX,SIM}$ influye en la extracción de parámetros, ya que este parámetro determina la eficiencia del dispositivo solar.

Otros factores que tienen un impacto directo en la representación de la curva simulada son R_s y R_p , por lo que la estimación precisa de estos parámetros es esencial para obtener una curva precisa. Sin embargo, es común en los métodos de extracción buscar simplificar el sistema de ecuaciones o asignar valores iniciales para el cálculo de estos parámetros, lo que plantea interrogantes sobre la confiabilidad del método. Dentro de estas simplificaciones se encuentra la asignación del factor de idealidad del diodo (n), donde se excluye el cálculo o estimación del mismo, asignándole un valor de acuerdo al tipo de tecnología o de acuerdo con lo indicado por la teoría de semiconductores.

Se concluye que el sistema de ecuaciones propuesto es exclusivamente aplicable para el análisis de paneles solares. Cuando se intentó aplicar el método para estudiar una celda individual, no produjo soluciones satisfactorias.

En términos generales, se concluye que $P_{MAX,SIM}$ es el parámetro clave para la estimación de parámetros, ya que, como se demostró en el capítulo 3, este parámetro determina la eficiencia del dispositivo solar. Aproximarse adecuadamente al valor de este parámetro garantizará la eficacia y confiabilidad del método de extracción. Por lo tanto, el planteamiento del sistema de ecuaciones y la técnica para determinar ciertos parámetros de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante en la hoja de datos son indispensables para obtener la curva I-V simulada.

Finalmente, es importante señalar que no se exploraron los métodos de optimización metaheurística debido a la complejidad computacional de estos métodos. Además, su aplicación requiere una base de datos que contenga las curvas I-V obtenidas por el fabricante (lo cual es muy complejo), la adquisición física del dispositivo a estudiar (celda/panel), y el equipo adecuado para obtener la curva I-V, lo que implica una inversión económica considerable en el estudio de dispositivos fotovoltaicos.

Capítulo 5. Método para la extracción de parámetros a partir del análisis de imágenes y pendiente de curva.

Ante las dificultades identificadas en la extracción de parámetros, tanto en la formulación del sistema de ecuaciones como en la reproducción de la curva I-V del fabricante mediante una curva simulada, este capítulo se propone un nuevo método basado en el procesamiento y análisis de imágenes. Además, se presenta una propuesta para calcular la resistencia en serie (R_s) considerando sus componentes y la influencia de ciertos parámetros que pueden ser controlados durante el proceso de fabricación de celdas solares.

5.1. Procesamiento de imágenes de curvas I-V, proporcionadas por el fabricante.

Al final del capítulo 4 se mencionó la necesidad de contar con una base de datos que incluya las curvas o puntos esenciales para llevar a cabo la extracción de parámetros mediante ciertos métodos. Esta condición puede plantear interrogantes acerca de la viabilidad del método propuesto, considerando que acceder a esta base de datos o incluso al dispositivo solar puede resultar económicamente exigente. Por ende, se plantea la siguiente metodología como alternativa para llevar a cabo la extracción de parámetros.

5.2. Metodología para la extracción de parámetros para celdas y paneles solares.

En la hoja de datos del fabricante [84], se suelen incluir los parámetros de desempeño del dispositivo, así como la representación gráfica de su comportamiento mediante la curva I-V (Figura 5.1).

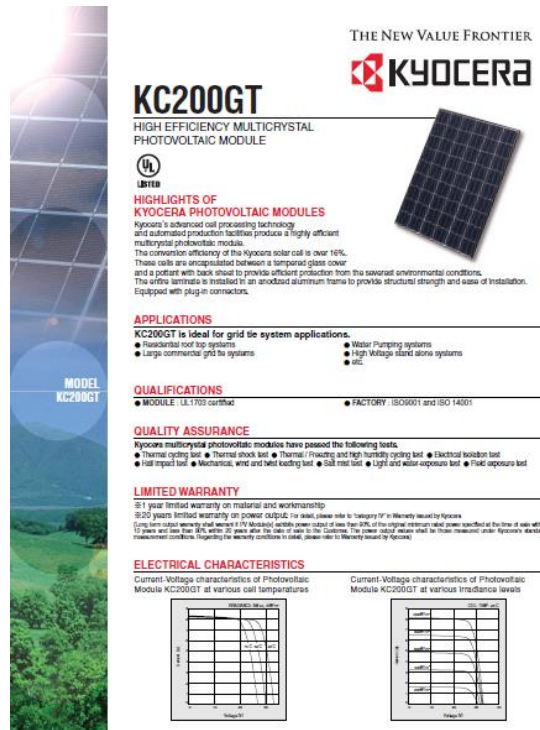


Figura 5.1. hoja de datos de un panel solar [84].

En los puntos 1-3, se describe el proceso del método desarrollado en el presente trabajo de tesis para llevar a cabo la extracción de parámetros:

1. La imagen de la curva I-V se somete a procesamiento con la ayuda de un software editor de imágenes. En este proceso, la curva I-V se ajusta en escala, se recorta y se mejora la resolución (ver Figura 5.2) [88].

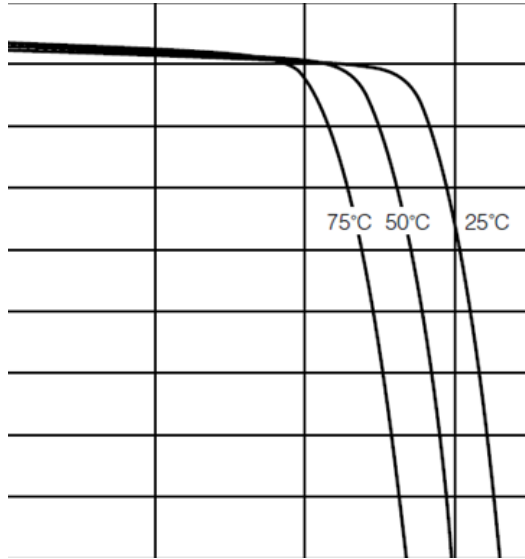


Figura 5.2. Imagen de la curva I-V, después del procesamiento.

2. Sobre la imagen de la curva I-V del dispositivo, con ayuda de Matlab, se proyecta un sistema de coordenadas, con la misma escala de la imagen original tanto en Voltaje (V) como en corriente (A), Figura (5.3.).

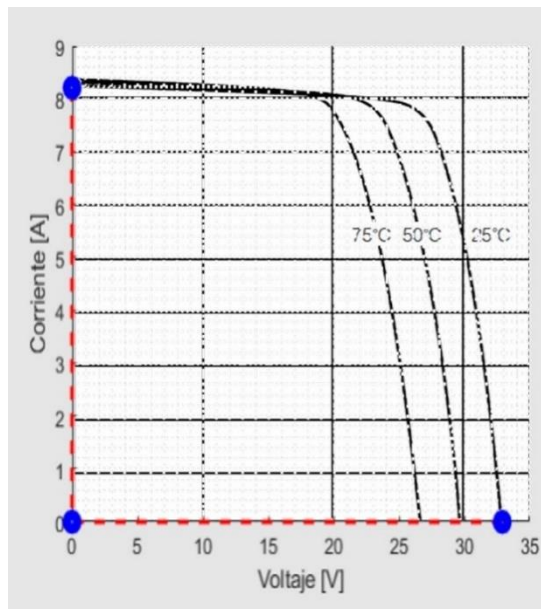


Figura 5.3. Sistema de coordenadas proyectado sobre la imagen de la curva I-V.

3. El sistema de coordenadas proyectado sobre la imagen de la curva I-V, ayudará a determinar la Región de Interés (ROI) [89]. de la cual se podrá tomar la información indispensable para realizar la extracción de parámetros.

Para llevar a cabo la extracción de parámetros, es esencial proponer soluciones al sistema de ecuaciones (2.8 - 2.12), considerando las condiciones extremas de operación de los dispositivos, una problemática identificada en el capítulo anterior. Además, el método propuesto debe tener la capacidad de reproducir tanto las curvas de celdas individuales como las de arreglos de celdas (paneles), un desafío que ha sido abordado por otros métodos previamente reportados en la literatura [42,52]. Sin embargo, al analizar paneles solares, surgen incertidumbres en el sistema de ecuaciones originalmente planteado.

En la búsqueda de reproducir tanto curvas de celdas individuales como de paneles solares, se usa la Ec. (5.1.), que considera el número de celdas conectadas en serie (N_s) que conforman el panel solar [38,42].

$$I_{SC} = I_{PV} - I_{O1} \left(e^{\frac{q(V + R_S I_{SC})}{n N_s k T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I_{SC}}{R_P} \quad (5.1)$$

Con el objetivo de evitar que el método quede atrapado en mínimos locales (como en métodos iterativos) o requiera información previa, generando una carga computacional significativa (como en métodos de optimización metaheurísticos), se opta por aplicar un enfoque "no iterativo" [38].

Como se estableció en el capítulo 4, P_{MAX} se considera el parámetro de desempeño principal, ya que en este punto se determina la eficiencia del dispositivo solar. De acuerdo con esto, se propone la siguiente consideración (ver figura 5.4).

En la figura 5.4, se muestra que tanto I_{SC} como V_{OC} deben permanecer como puntos fijos, mientras que $P_{MAX, SIM}$ será el encargado de ajustar la curva simulada para que se aproxime a la curva experimental o la proporcionada por el fabricante.

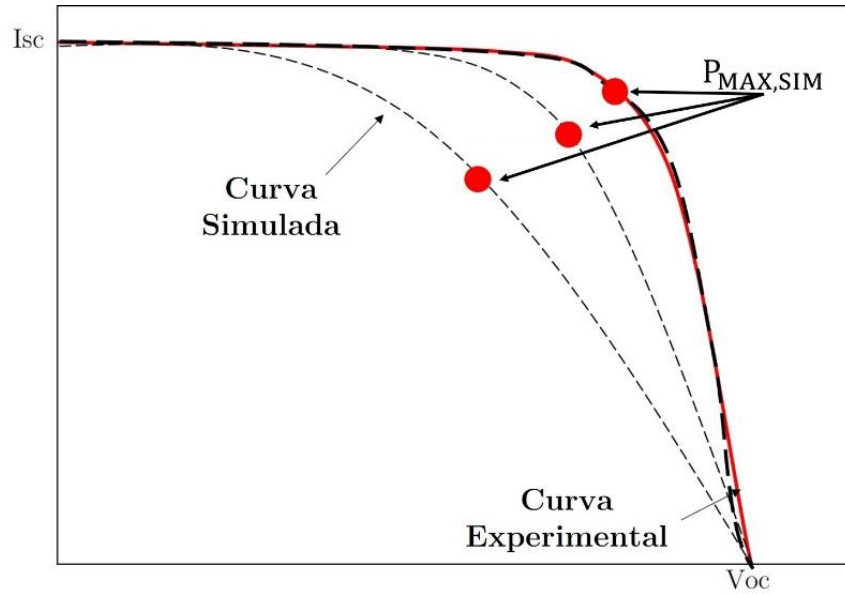


Figura 5.4. Aproximación de $P_{MAX,SIM}$ a la $P_{MAX,FAB}$.

De acuerdo con lo anterior y basado en la hoja de datos del fabricante, se establece el siguiente sistema de ecuaciones

$$R_S = \frac{V_2 - V_{OC}}{I_2} \quad (5.2)$$

$$R_P = \frac{V_2}{I_2 - I_{SC}} \quad (5.3)$$

$$I_{PV,ref} = I_{SC,FAB} \frac{R_P + R_S}{R_P} \quad (5.4)$$

$$I_{PV} = I_{PV,ref} \frac{G}{G_{ref}} \quad (5.5)$$

$$n = \frac{(R_S I_{MPP} + V_{MPP} - V_{OC})q}{kTN_S \ln \left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_{PV}} \right)} \quad (5.6)$$

$$I_0 = \frac{(I_{PV} - I_{SC,FAB})R_P - I_{SC,FAB}R_S - V_{OC,FAB}}{R_P \left(e^{\frac{q(V_{OC,FAB} + I_{SC,FAB}R_S)}{nN_S kT}} - 1 \right)} \quad (5.7)$$

De las ecuaciones (5.2) y (5.3), se tiene que el segundo punto (P2) para determinar la pendiente en cada rama de la curva I-V, tiene coordenadas (V_2, I_2) .

Con el sistema de ecuaciones definido para calcular los parámetros que caracterizan al SDM, se implementa una interfaz gráfica de usuario (GUI) mediante MATLAB. Esto se realiza con el propósito de facilitar la visualización de los resultados y la aplicación del análisis de imágenes (ver Figura 5.4).

Dentro de la GUI, presentada en la Figura 5.4, los usuarios tienen la capacidad de ingresar los parámetros proporcionados por el fabricante, así como la imagen de la curva I-V previamente procesada. Además, pueden ajustar las dimensiones del eje de coordenadas para que coincidan con los ejes originales presentados por el fabricante.

La GUI, a través de barras deslizadoras (Figura 5.5), brinda al usuario la posibilidad de seleccionar las coordenadas del segundo punto para la estimación de R_s (Ec. 5.2) y R_p (Ec. 5.3), ya sea en la rama de V_{OC} o en la rama de I_{SC} , respectivamente.

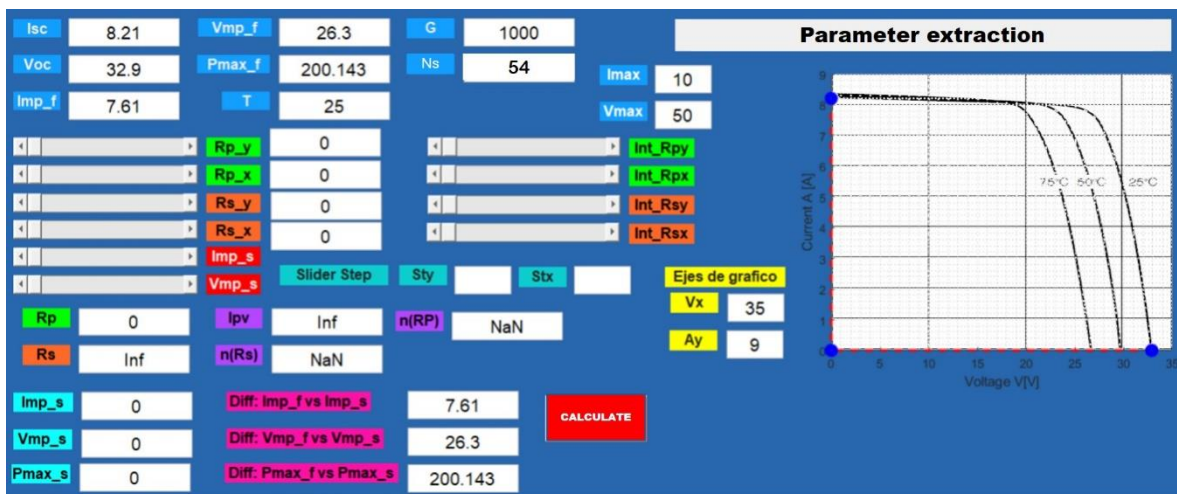


Figura 5.4. GUI, programada en MATLAB, para llevar a cabo la extracción de parámetros.

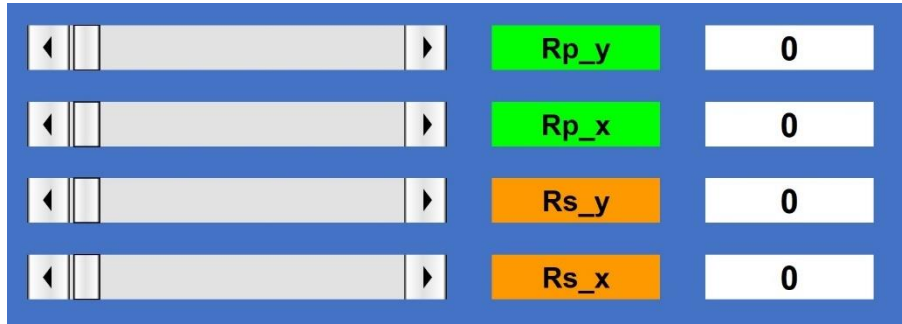


Figura 5.5. Barras deslizadoras, para la ubicación del punto de cálculo de Rs y Rp.

Para complementar los cálculos, es posible seleccionar el $P_{MAX,FAB}$ a través de barras deslizadoras (Figura 5.6), el cual está definido por (V_{MPP}, I_{MPP}) . Esto elimina la incertidumbre asociada con la estimación de este punto y asegura que el cálculo de los demás parámetros no se vea afectado al seleccionar un P_{MAX} por encima o por debajo de la indicación proporcionada por el fabricante.

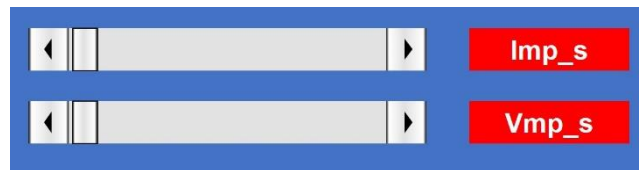


Figura 5.6. Barras deslizadoras para la ubicación de P_{MAX} .

Es fundamental destacar que la GUI programada también permite el ajuste al paso de aproximación (Figura 5.7). Esto significa que el usuario tiene la capacidad de determinar qué tan "fino" desea que sean los ajustes realizados por las barras deslizadoras, tanto para Rs, Rp como para P_{MAX} , acercándolos a la curva proporcionada por el fabricante o la curva experimental



Figura 5.7. Ajuste de paso de aproximación.

5.3. Extracción de parámetros para celdas y paneles solares comerciales mediante el método propuesto.

Para validar la metodología propuesta, se examinan algunos dispositivos documentados en la literatura, como la celda solar individual RTC France (1986) [90] y el panel solar Kyocera KC200GT (2009) [23,84], compuesto por 54 celdas. Dado que estos dispositivos podrían considerarse obsoletos en comparación con aquellos obtenidos con nuevos procesos de fabricación, tecnologías y/o configuraciones, se analiza también el panel solar SP-144M [91].

5.3.1. Celda solar RTC France [90].

Los datos necesarios para realizar los cálculos se presentan en la tabla 5.1, estos datos son proporcionados por el fabricante [90].

Tabla 5.1.
Datos de entrada para la extracción de parámetros.

Parámetro	Valor	Unidades
I _{sc}	0.7603	A
V _{oc}	0.5728	V
P _{MAX}	0.3107	W
I _{MPP}	0.6894	A
V _{MPP}	0.4507	A
T	33	°C
G	1000	W/m ²

En [90], se indica que el dispositivo fue caracterizado a una temperatura de $T = 33$ °C, la cual se utilizará para calcular I_0 , según la Ec. (5.7). En la figura 5.8 se muestra la ubicación de los puntos R_s , R_p y P_{MAX} en la imagen de la curva I-V, la cual también se ha obtenido de [91]. En este caso, $N_s = 1$, ya que se trata de una celda individual.

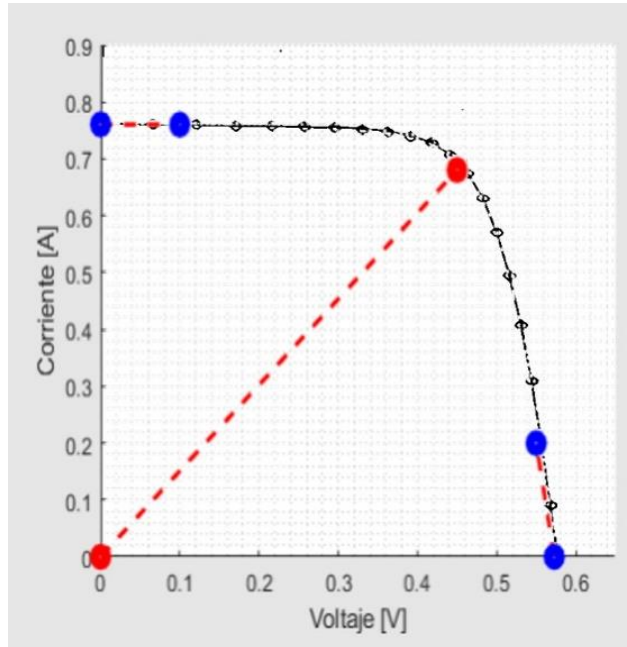


Figura 5.8. Ubicación de puntos para la extracción de parámetros, seleccionando las regiones y puntos de interés, en la curva de la celda solar RTC France.

Los resultados obtenidos al aplicar el método de extracción propuesto, se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2.
Extracción de parámetros para celda RTC France.

Parámetro	Valor	Unidades
I_{PV}	0.7603	A
I_o	2.46e-8	A
R_s	0.843	Ω
R_p	333.33	Ω
N	1.266	

5.3.2. Panel solar KC200GT [84].

Continuando con la validación de la metodología propuesta, se aplica la extracción de parámetros para el panel Kyocera [84]. Los datos necesarios para realizar los cálculos se toman de la tabla 4.1. Dado que se trata de un panel solar, se tiene $N_s = 54$. La figura 5.9 ilustra cómo se vuelven a ubicar los puntos para llevar a cabo la extracción de parámetros.

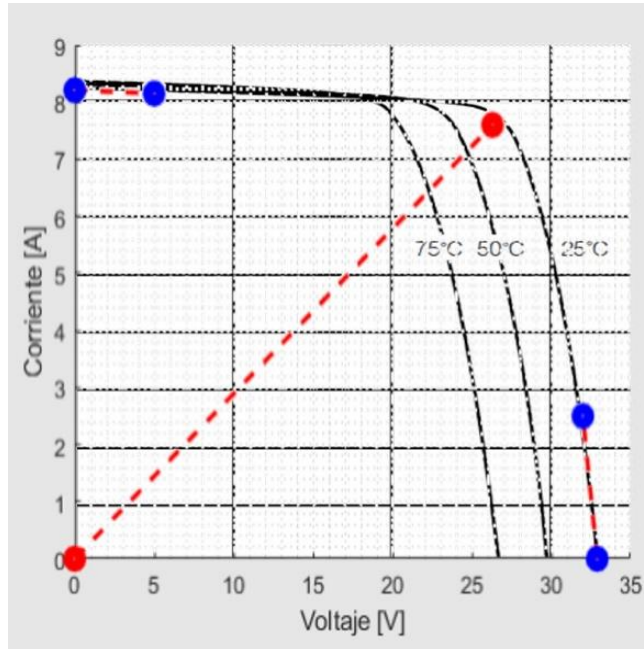


Figura 5.9. Ubicación de puntos R_s , R_p y P_{MAX} , para delimitar la región de interés (ROI), para el cálculo de parámetros. Panel Kyocera [84].

Los resultados obtenidos al realizar la extracción de parámetros se detallan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3.
Extracción de parámetros para el panel KC200GT.

Parámetro	Valor	Unidades
I_{PV}	8.212	A
I_o	8.789e-8	A
R_s	0.253	Ω
R_p	801.5	Ω
N	1.1213	

5.3.3. Panel solar SP-144M [91].

Se implementa el método de extracción propuesto en el panel comercial SP-144M, compuesto por 144 celdas de tecnología mono-Si PERC. Según la información proporcionada por el fabricante, este panel puede alcanzar una P_{MAX} de 450 W. Los datos de entrada necesarios para realizar los cálculos se presentan en la tabla 5.4.

Tabla 5.4.

Datos de entrada para la extracción de parámetros del panel SP-144M [91].

Parámetro	Valor	Unidades
ISC	11.56	A
Voc	49.8	V
P _{MAX}	450	W
I _{MPP}	10.98	A
V _{MPP}	41.0	A
T	25	°C
G	1000	W/m ²

En la figura 5.10, se muestra la ubicación de los puntos P_{MAX} (rojo) y los puntos para determinar Rs y Rp.

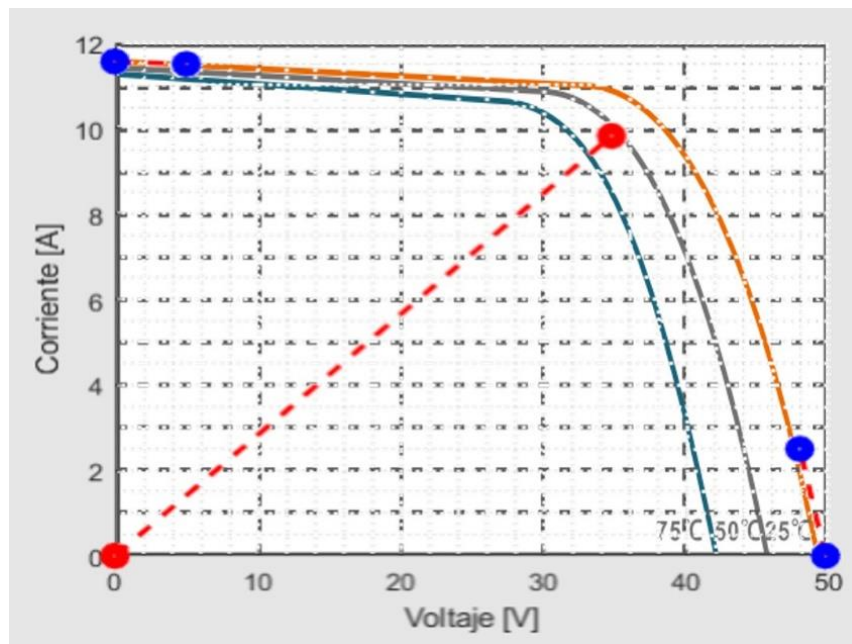


Figura 5.10. Ubicación de puntos para seleccionar la región de interés (ROI), para la estimación de Rs, Rp y P_{MAX}, sobre la imagen de la curva I-V del panel SP-144M.

La tabla 5.5, muestra los resultados obtenidos al aplicar el método propuesto.

Tabla 5.5.

Extracción de parámetros para el panel SP-144M.

Parámetro	Valor	Unidades
I_{PV}	11.195	A
I_0	3.22e-07	A
R_s	0.7	Ω
R_p	90.909	Ω
N	1.8535	

5.4. Extracción de parámetros para celdas solares fabricadas en INAOE.

Como complemento y para validar la metodología propuesta en este trabajo, se examinaron celdas individuales fabricadas en el laboratorio de LI-MEMS de INAOE. Para obtener los parámetros de rendimiento, fue necesario obtener la curva I-V utilizando el simulador solar *Oriel Newport* (ver Figura 3.4). Sin embargo, durante el proceso de obtención de estas curvas, se observó que, al realizar mediciones consecutivas en una misma celda, no se obtenían los mismos parámetros de rendimiento (Tabla 5.6).

Tabla 5.6.

Comparación de mediciones para una misma celda.

Parámetros	1a medición	2da medición	Diferencia
Voc (V)	5.50E-01	5.40E-01	1.85 %
Isc (A)	3.23E-02	3.23E-02	0 %
Pmax (W)	1.21E-02	1.13E-02	6.35 %
Jsc (A/cm ²)	3.23E-02	3.23E-02	0 %
FF	0.6794	0.6503	4.47 %
Eff	12.05	11.33	6.35 %

De la Tabla 5.6 se observa que algunas mediciones consecutivas afectan ciertos parámetros, siendo la eficiencia del dispositivo la más notablemente afectada. Por consiguiente, se tomó la decisión de realizar un estudio sobre las variaciones de temperatura y la búsqueda del punto de máxima radiación emitida por la lámpara del

simulador solar. Estos factores desempeñan un papel crucial en el funcionamiento de los dispositivos solares. Dado que uno de los objetivos centrales de este trabajo es evaluar la influencia de estos parámetros en el modelo propuesto, se llevó a cabo un estudio con el fin de proponer un protocolo de mediciones.

5.4.1. Evaluación de la potencia radiante emitida por la lámpara del simulador solar.

El simulador solar utilizado presenta una variación de potencia radiante de $\pm 5\%$ en la región donde se coloca la muestra (celda solar) para su caracterización. En este contexto, se utiliza un electrómetro para identificar el punto de mejor radiación determinado por el valor máximo de I_{sc} . Para lograr esto, se realiza un desplazamiento manual del soporte de pruebas hasta encontrar la corriente mencionada.

Durante esta etapa, también se llevó a cabo la verificación y limpieza de las puntas y cables de medición para garantizar su buen estado y minimizar su impacto en las mediciones. Con el uso de un luxómetro (ver Figura 5.11), se realizaron análisis en las áreas de la base del probador, donde se registra una mayor incidencia de luz proporcionada por la lámpara. Sin embargo, se observó que en la zona central del “chuck” y debido a las dimensiones de las celdas (1 cm^2), no se presentan cambios sustanciales en la potencia radiante. Por ende, se llegó a la conclusión de que la intensidad de luz emitida por la lámpara del simulador no influye de manera significativa en mediciones consecutivas.

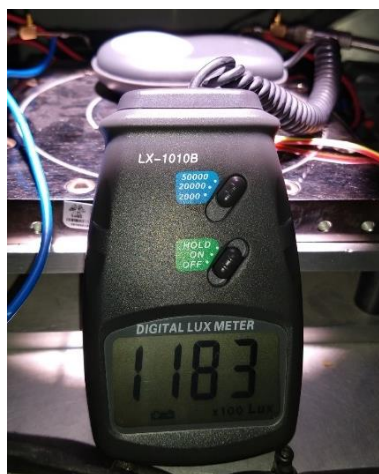


Figura 5.11. Luxómetro usado para determinar las zonas con más iluminación sobre la base de pruebas.

5.4.2. Análisis del impacto de la temperatura generada por la lámpara del emulador solar en las celdas a nivel de oblea.

En la fase inicial del estudio de temperatura, se empleó el sensor LM35 programado con Arduino para medir la temperatura inicial indicada por el sensor antes de abrir el obturador de la lámpara. Se registró la temperatura final detectada por el sensor después de un período de exposición. Posteriormente, se permitió que el sistema se enfriara durante un intervalo de tiempo, y se volvieron a registrar las temperaturas inicial y final, variando los tiempos de exposición y enfriamiento en cada caso.

Para un primer análisis, se realizaron seis pruebas (sin dispositivo bajo prueba, solo el chuck), variando tanto el tiempo de enfriamiento como el tiempo de exposición como se muestra en la Tabla 5.7:

Tabla 5.7.
Tiempo de exposición vs enfriamiento

Prueba	Tiempo de Exposición (s)	Tiempo de enfriamiento (s)
I	10 - 120	10
II	10 - 120	20
III	10 - 120	30
IV	10 - 120	40
V	10 - 120	50
VI	10 - 120	60

El tiempo de exposición se aumentó en incrementos de 10 s con respecto a la exposición anterior, llegando hasta los 120 s. Mientras tanto, los tiempos de enfriamiento entre cada exposición permanecieron constantes en cada prueba. La figura 5.12 ilustra las temperaturas alcanzadas en cada prueba y la temperatura alcanzada durante todo el análisis.

Como se ilustra en la gráfica de la figura 5.12, al inicio del análisis, la temperatura ambiente era de 26 °C, y aumentó hasta alcanzar los 31.5 °C durante la duración total de 61 minutos que comprendió el estudio en general.

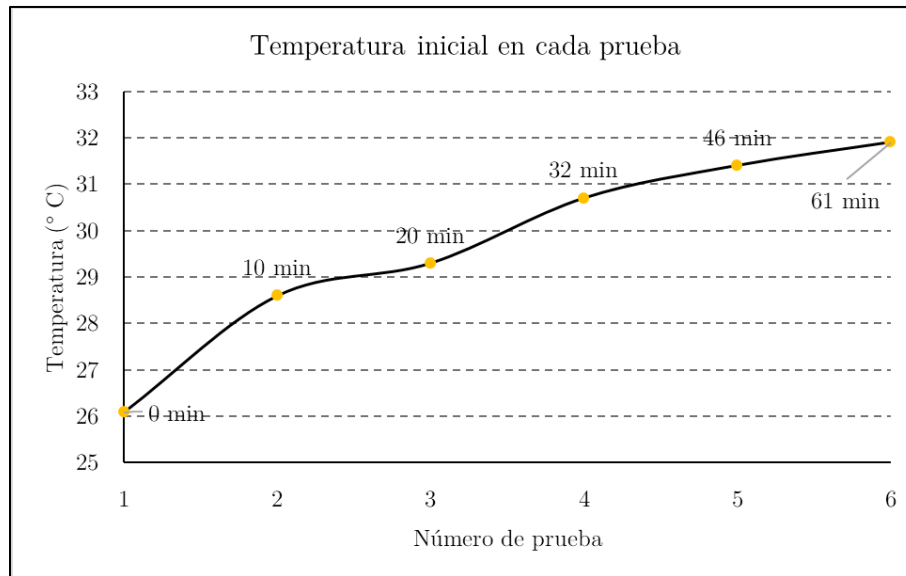


Figura 5.12. Gráfica de temperaturas alcanzada durante cada prueba.

En una segunda prueba, se procedió a colocar una celda y obtener sus parámetros de desempeño. Inicialmente, la eficiencia de esta celda fue del 12.05 %, con una temperatura inicial de 26.8 °C. Al determinar la zona de máxima corriente de cortocircuito (I_{sc}), se registró un valor máximo de 32.26 mA. Sin embargo, tras ser expuesta a la radiación, la temperatura mínima alcanzada durante un periodo de enfriamiento de 15 minutos fue de 29.9 °C. Como consecuencia, no fue posible retornar a las condiciones iniciales, y la I_{sc} máxima disminuyó a 29.32 mA, al igual que la eficiencia del dispositivo (Tabla 5.8).

Tabla 5.8.

Influencia de la temperatura en la obtención de parámetros de desempeño.

Parámetros	Medición (26.8 °C)	Medición (29.9 °C)	Diferencia
Voc (V)	5.50E-01	5.30E-01	3.636 %
Isc (A)	3.226E-02	2.932E-02	9.113 %
Pmax (W)	1.20E-02	9.67E-03	19.416 %
Jsc (A/cm ²)	3.226E-02	2.932E-02	9.113 %
FF	0.6794	0.599	11.833 %
Eff	12.05	9.67	19.751 %

A partir de lo expuesto, se deduce de manera general que es necesario implementar un sistema de enfriamiento que regule la temperatura del simulador. Esta medida es

necesaria para garantizar condiciones uniformes en cada medición, ya que la falta de tal control conlleva a variaciones en las mediciones, incluso cuando la celda y su posición inicial sobre la base de pruebas permanecen sin alteraciones.

5.4.2.1. Implementación de sistema de control de temperatura.

En las referencias [92,93], se destaca que un sistema de caracterización de celdas solares debería constar principalmente de:

- I. Una lámpara con una potencia radiante de 1000 W/m^2 .
- II. Una fuente controlada de corriente-voltaje.
- III. Un sistema de control de temperatura (aire y agua a $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

No obstante, como se ilustra en la Figura 5.13, el simulador de INAOE solamente incorpora dos de los tres componentes mencionados.

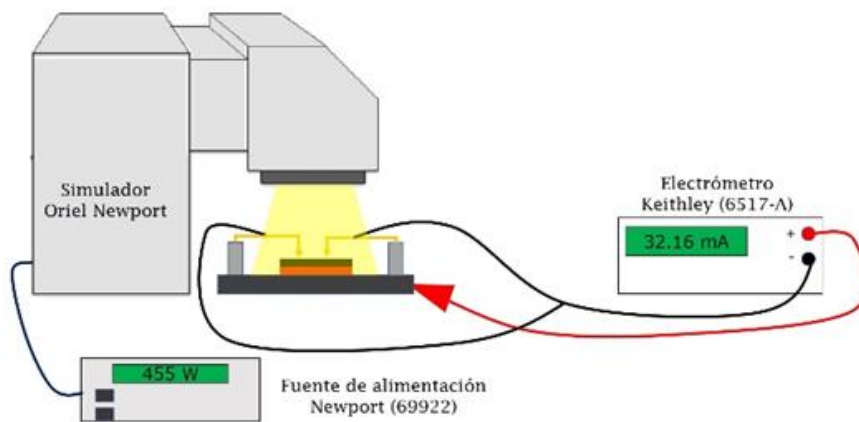


Figura 5.13. Componentes del simulador *Oriel Newport* instalado en los laboratorios de INAOE:

Por lo tanto, se implementó un control de temperatura mediante ventiladores, como se representa en la figura 5.14. El sistema propuesto, mostrado en la misma figura, se sitúa lo más cerca posible de la base de pruebas, permitiendo que los ventiladores sean orientados a la posición deseada por el usuario. Estos ventiladores tienen un rango de giro en el eje "y" de 0° a 180° y en el eje "z" de 0° a 360° .

Los resultados derivados de la implementación del sistema de control de temperatura se presentan en la tabla 5.9. La duración de la prueba fue de aproximadamente 70 minutos. En este primer estudio, se mantuvo el obturador cerrado en todo momento y los ventiladores del control de temperatura estuvieron activados.



Figura 5.14. Sistema regulador de temperatura.

Tabla 5.9.
Estudio de temperatura usando ventiladores.

Tiempo	Temperatura	Estado del obturador	Estado de lámpara
20 min	26.1 °C	Cerrado	Encendida
30 min.	26.4 °C	Cerrado	Encendida
35 min.	26.5 °C	Cerrado	Encendida
40 min.	26.6 °C	Cerrado	Encendida
50 min.	27 °C	Cerrado	Encendida
60 min.	27.1 °C	Cerrado	Apagada
70 min.	27.1 °C	Cerrado	Apagada

Como se evidencia en la tabla 5.9, la activación de los ventiladores permite un control más efectivo de la temperatura, en comparación con lo mostrado en la tabla 5.10. En esta última, se observa un aumento de temperatura de 2 °C en un intervalo de 10 minutos, sin posibilidad de retornar al estado inicial.

Tabla 5.10.
Estudio de temperatura sin ventiladores.

Tiempo	Temperatura	Estado del Emulador
0 min.	26.5 °C	Apagado
5 min.	26.8 °C	Encendido de lámpara
10 min.	27.5 °C	Obturador cerrado
20 min	29.9 °C	Obturador cerrado

Los resultados presentados en la Tabla 5.10 confirman que, a lo largo de un período extenso de más de una hora en comparación con la temperatura inicial, el aumento de temperatura es de tan solo 3.4 grados.

La gráfica presentada en la Figura 5.15 muestra el aumento gradual de temperatura al usar los ventiladores, contrastando con el aumento abrupto cuando no se encuentran encendidos.

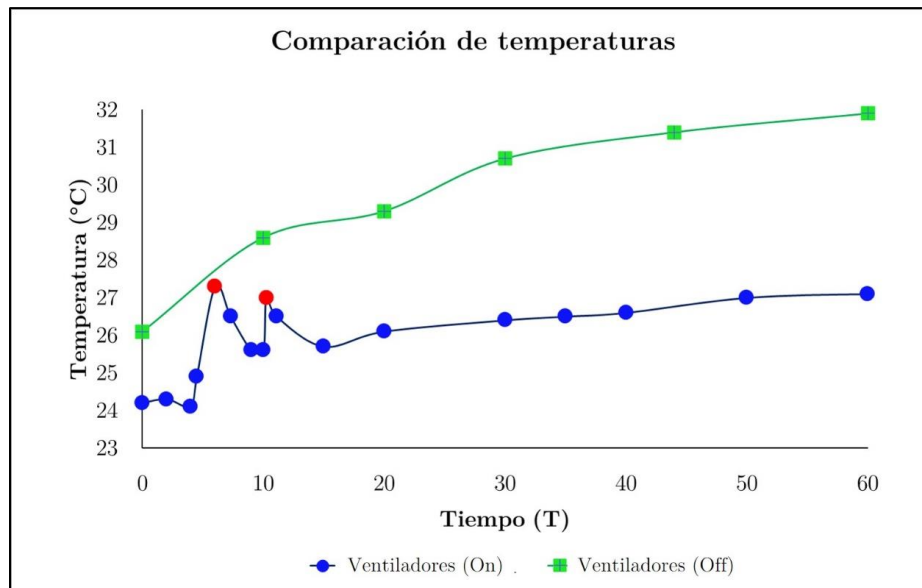


Figura 5.15. Comparación entre temperaturas al mantener los ventiladores apagados (Off) y mantenerlos encendidos (On).

En la figura 5.15, se resaltan dos puntos en color rojo, que indican el momento en que se abre el obturador para exponer luz sobre el "chuck". A pesar de ello, la temperatura no supera la alcanzada cuando los ventiladores están apagados, lo que contribuye a obtener mediciones más estables, como se muestra en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11
Obtención de parámetros al implementar el control de temperatura

Parámetros	Medición 1 (27.2 °C)	Medición 2 (27.2 °C)	Medición 3 (27.2 °C)	Dif 1-2 (%)
V_{OC} (V)	0.5506	0.5506	0.5500	0-0.1
I_{SC} (A)	3.11e-02	3.10e-02	3.11e-02	0-0.32
P_{MAX} (W)	1.060e-02	1.062e-02	1.049e-02	0-0.1
J_{SC} (W/cm ²)	3.11e-02	3.10e-02	3.11e-02	0-0.32
FF	0.619	0.621	0.611	0.3-1.6
EFF	10.563	10.620	10.48	0.5-1.3

La implementación del control de temperatura resulta en mediciones más próximas a la medición inicial, tal como se observa en la tabla anterior. Estos resultados serán de gran utilidad para extraer los parámetros de los dispositivos fabricados en el INAOE.

5.5. Extracción de parámetros para las celdas solares a nivel oblea de c-si fabricadas en INAOE.

Para validar el método de extracción de parámetros de celdas y paneles solares propuesto, se caracterizaron celdas de silicio cristalino con una estructura simple, como se detalla en el Capítulo 3, con el objetivo de realizar la extracción de parámetros.

Dado que el método propuesto está programado para permitir la desactivación de la función de análisis de imágenes, es posible analizar la curva I-V obtenida de forma experimental. En la figura 5.16, se muestra cómo pueden ubicarse los puntos para estimar R_s y R_p , además de la aproximación a P_{MAX} .

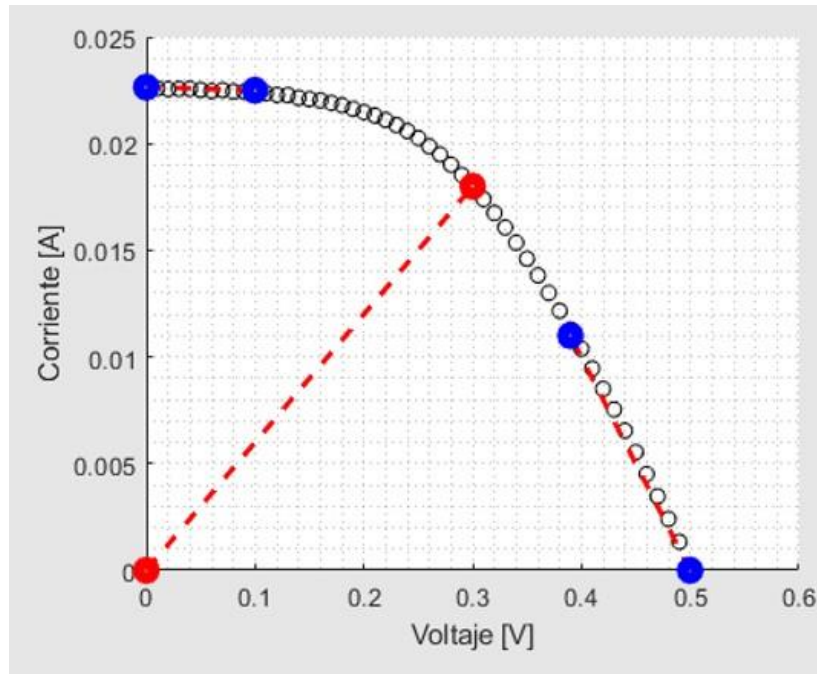


Figura 5.16. Ubicación de puntos para la extracción de parámetros para una celda solar fabricada en INAOE (INAOE-17).

Los parámetros de desempeño se muestran en la tabla 5.12 y los obtenidos en la extracción se muestran en la tabla 5.13.

Tabla 5.12.

Parámetros de desempeño obtenidos en el simulador solar.

Parámetro	Valor	Unidades
I _{sc}	2.266E-02	A
V _{oc}	0.51	V
P _{MAX}	5.94e-03	W
I _{MPP}	1.85e-02	A
V _{MPP}	0.32	V
T	28.1	°C
G	1000	W/m ²

Es relevante señalar que los datos presentados en la Tabla 5.12 y la curva de la Figura 5.16 representan el promedio de un conjunto de 10 mediciones realizadas en la misma celda.

Tabla 5.13.

Extracción de parámetros para la celda INAOE-17.

Parámetro	Valor	Unidades
I_{PV}	0.7608	A
I_o	2.34e-07	A
R_s	0.036	Ω
R_p	53.7965	Ω
N	1.4838	

5.5.1. Estimación teórica de la resistencia en serie (R_s) a partir de la profundidad de unión (x_j).

Como se detalló en la sección 5.2, debido a la capacidad de seleccionar libremente las regiones de interés (ROI) tanto en la imagen de la curva I-V como en la curva experimental, es imperativo delimitar la zona a lo largo de las ramas de I_{SC} o V_{OC} , donde R_p y R_s pueden tener mayor influencia.

Algunos autores [94,95] sugieren que la pendiente de la recta en la curva I-V puede ser tomada desde el punto P_{MAX} , como se ilustra en la Figura 5.17. Por otro lado, otros autores [96] mencionan que se puede seleccionar una porción de aproximadamente el 15-20 % en la rama de V_{OC} para calcular la resistencia en serie (R_s).

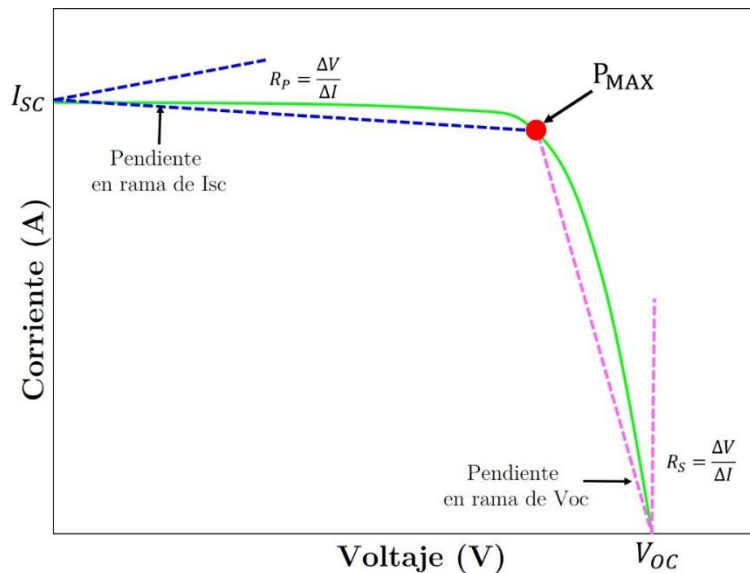


Figura 5.17. Cálculo de R_s y R_p a partir de P_{MAX} [94,95].

Dado lo expuesto y considerando que se tiene disponible el proceso de fabricación de celdas solares en INAOE [9], se procedió a analizar la estructura de la celda solar (Figura 3.1). A partir de las ecuaciones que definen los componentes de R_s (R1-R7), se puede observar que la resistencia es un factor importante en las zonas de contacto metal-semiconductor.

En la búsqueda de alcanzar la máxima eficiencia para las celdas fabricadas en INAOE, se llevaron a cabo cuatro procesos (I-IV), de acuerdo a lo descrito en [9]. Durante estos procesos, se determinó que el parámetro que ejerce la mayor influencia en la eficiencia es la profundidad de unión (x_j), la cual también incide en la resistencia de hoja (R_{SH}), según lo expresado por la Ec. (3.12), lo cual queda mejor representado en la tabla 5.14.

Tabla 5.14.
Comparación de x_j vs R_{SH} en la formación del emisor.

Proceso	x_j (μm)	R_{SHE} (Ω/sq)
I	0.87	16.43
II	0.75	18.08
III	0.70	24.71
IV	0.60	29.71

En la tabla 5.14 se detallan los distintos procesos realizados [9] con el propósito de determinar la temperatura óptima. Se observa que, al contar con una profundidad de unión más superficial, se mejora el desempeño de la celda solar, resultando en un aumento de la corriente de cortocircuito y la eficiencia (I_{SC} , η , figura 5.18).

En [9] se menciona que x_j puede ser determinada con ayuda de un perfilador electroquímico [96]; sin embargo, esta puede ser calculada de acuerdo con la Ec. 3.10.

Dado que la concentración de fósforo para este caso en particular es de $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, (obtenido de tablas [25]) se considera como una difusión extrínseca, donde el coeficiente de difusión queda definido por la Ec. (3.8). Los resultados obtenidos para el cálculo de x_j se muestran en la tabla 5.15, donde se consideró el mismo tiempo de predeposición y de redifusión, dejando variable la temperatura.

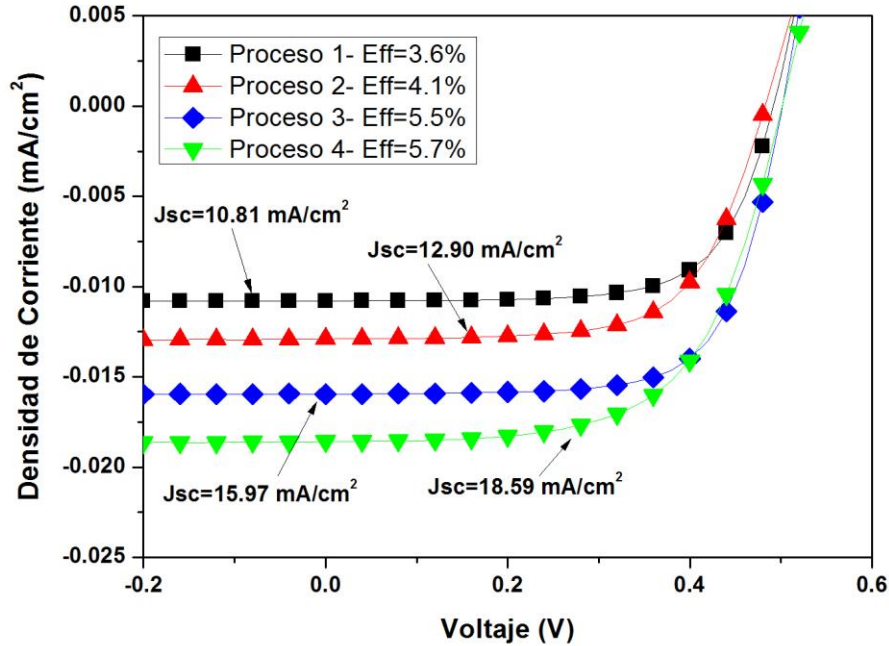


Figura 5.18. Curvas I-V, para las temperaturas de cada proceso [9].

Tabla 5.15
Cálculo de profundidad de unión x_j .

Temperatura (K)	n_i (T) [19]	x_j [17] (m)	x_j (Teórico) m	Diff
1373	1.878E+19	3.00E-06	4.18E-06	28%
1323	1.42E+19	2.50E-06	2.70E-06	8%
1273	1.06E+19	1.60E-06	1.69E-06	6%
1223	7.68E+18	1.00E-06	1.02E-06	2%

A partir de la información en la Tabla 5.15, se puede inferir que la determinación de x_j a temperaturas elevadas puede ser compleja. Por ejemplo, para una temperatura de $T = 1323$ K, los resultados obtenidos experimentalmente en [9] muestran una discrepancia significativa del 28% en comparación con los obtenidos teóricamente en el presente estudio. En contraste, para temperaturas más bajas, donde se logra una x_j superficial, los cálculos teóricos se aproximan a los resultados experimentales con un error del 2%.

Una vez obtenida la temperatura óptima para el proceso de difusión, se determinó el tiempo de difusión, dado que x_j también depende de este parámetro. En la tabla 5.16 se detallan los tiempos en los cuales se llevó a cabo la difusión.

Como se observa en la tabla 5.16, tanto el tiempo de predepósito como el de redifusión son los mismos, disminuyendo en intervalos de 5 minutos, mientras que la temperatura se mantiene constante para los cuatro casos de estudio (950 °C).

Tabla 5.16
Difusión de fosforo a 950 °C, en diferentes lapsos de tiempo

Proceso	Predepósito	Redifusión
1	25 min	25 min
2	20 min	20 min
3	15 min	15 min
4	10 min	10 min

La Tabla 5.17 presenta los resultados obtenidos al modificar el tiempo de difusión en los cálculos, dejando fija la temperatura a 950 °C.

Tabla 5.17.
Cálculo de x_j en diferentes tiempos de difusión

Temp. (°C)	Tiempo (min)	x_j Teórico m	x_j [17] (Sim) m	x_j [17] (Exp) m	Diff 1	Diff 2
950	25	9.28E-07	8.7E-07	8.70E-07	6.67%	6.67%
950	20	8.30E-07	7.5E-07	8.00E-07	10.67%	3.8%
950	15	7.19E-07	7.00E-07	7.00E-07	2.71%	2.7%
950	10	5.87E-07	6.00E-07	6.10E-07	2.21%	3.9%

En la Tabla 5.17, se presentan dos comparaciones directas. La Diferencia 1 (Diff 1) se establece entre el cálculo teórico de x_j y la x_j obtenida por simulación (Sim, en PC1D), mientras que la Diferencia 2 (Diff 2) corresponde a la diferencia entre el cálculo teórico y el experimental (exp).

5.5.1.1. Configuración de resistencias para el cálculo de la resistencia en serie (Rs).

En el capítulo 3, se describieron los componentes de la resistencia en serie (R1-R7), así como las características estructurales de la unión p-n y la geometría de la rejilla de contacto superior.

Para llevar a cabo el análisis y cálculo de la resistencia en serie, se propone una red de resistencias como se muestra en la figura 5.19. Este circuito incluye la resistencia de contacto (metal-semiconductor) generada en cada dedo de la rejilla superior (R5), la resistencia entre cada dedo de la rejilla (R4), y la resistencia del dedo de la rejilla (R6). Dado que cada dedo está conectado a la barra colectora, se considera que cada resistencia generada por R4-R6 está en paralelo con el dedo siguiente.

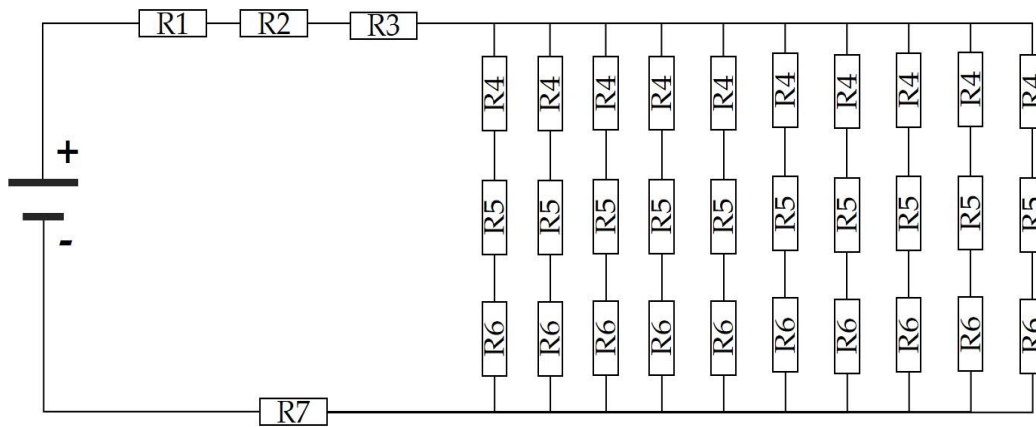


Figura5.19. Red de resistencias para el cálculo de R_s .

En la figura anterior, los resistores R1, R2, R3 y R7 representan resistencias comunes asociadas con el contacto de metal en la parte posterior de la celda solar, que se comparte en cualquier parte de la celda, así como el contacto con el semiconductor tipo p, la resistencia del sustrato y la barra colectora. La resistencia asociada con cada dedo se determina mediante la siguiente ecuación.

$$R_{S1-10} = R_4 + R_5 + R_6 \quad (5.8)$$

La Ec. (5.8) proporcionará una resistencia en serie para cada dedo, resultando en R_{S1} , R_{S2} , R_{S3} , ..., R_{S10} . Con estas resistencias en serie, la configuración de la red de resistencias presentada en la figura 5.19 se simplificará, como se muestra en la figura 5.20.

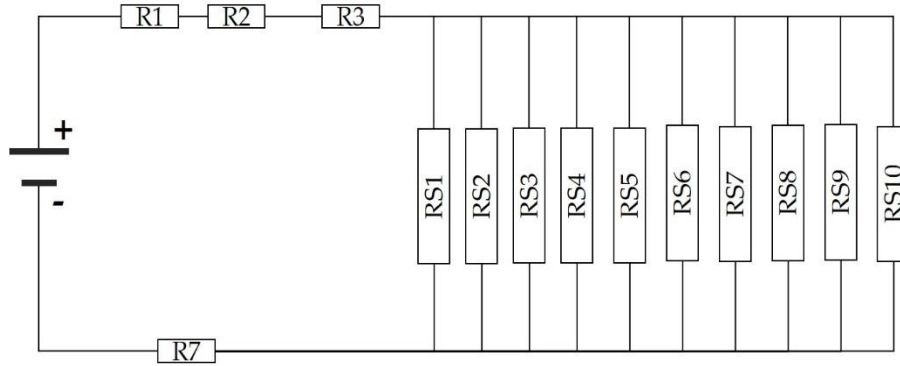


Figura 5.20. Configuración de resistencias después de realizar el análisis del circuito mediante la ecuación (5.1).

Con la nueva configuración de resistencias mostrada en la figura 5.18, se realiza nuevamente el análisis del circuito, calculando la resistencia en paralelo (Ec. 5.9) hasta obtener la resistencia equivalente R_{Eq} . Esto permitirá realizar el cálculo final para determinar el valor de R_s .

$$R_{Eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{S2}} + \dots + \frac{1}{R_{S10}}} \quad (5.9)$$

La resistencia equivalente resultante se muestra en la nueva configuración de resistencias en la figura 5.21. A través de esta red actualizada y realizando nuevamente el análisis del circuito (Ec. 5.10), se determina el valor de la resistencia en serie (R_s) de la celda.

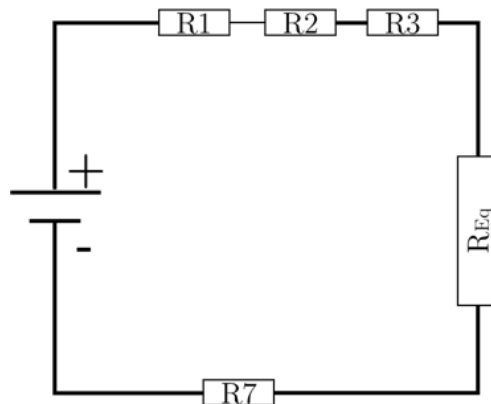


Figura 5.21. Circuito equivalente resultante, al aplicar la Ec. (5.9).

$$R_{\text{Scell}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{\text{Eq}} + R_7 \quad (5.10)$$

Los cálculos se presentan utilizando las ecuaciones de la tabla 3.2 para estimar R1-R7, junto con las ecuaciones (3.11, 3.14, 3.16 y 5.1-5.3). La tabla 5.18 detalla los parámetros relacionados tanto con la geometría de la rejilla como con las propiedades de los materiales (el sustrato y el material conductor).

Tabla 5.18
Propiedades del material y geometría de la rejilla para el cálculo de R_s [62].

Nombre	Parámetros	Valor	Unidades
Resistividad del metal	ρ_{met}	2.82 e-8	Ω -cm
Resistividad del sustrato	ρ_{SUB}	5-15	Ω -cm
Ancho del dedo	W_f	100	μm
Longitud del dedo	L_f	1.9	mm
Ancho del contacto posterior	W_{BC}	1	cm
Longitud del contacto posterior	L_{BC}	1	cm
Acho de la barra colectora	W_B	300	μm
Longitud de la barra colectora	L_B	1	cm
Espesor del metal	t_{met}	0.5-1	μm
Espesor del sustrato	t_{SUB}	300	μm
Area de la celda	A_{CELL}	1	cm^2

Tanto para el emisor como para la base, la resistencia superficial se determina de acuerdo con la ecuación (3.6), tomando una resistividad de $5 \Omega \cdot \text{cm}$ para el sustrato (R_{SHSUB}), y utilizando la técnica de cuatro puntos en el caso del emisor (R_{SHE}). Las variaciones de R_{SHE} y R_{SHSUB} , conforme a x_j de cada proceso de fabricación I-IV, se detallan en la tabla 5.19.

Tabla 5.19.
Comparación de x_j y R_{SH} para sustrato y emisor.

Proceso	x_j (μm)	R_{SHE} (Ω/sq)	R_{SHSUB} (Ω/sq)
1	0.87	16.43	167.12
2	0.75	18.08	167.36
3	0.70	24.71	167.08
4	0.60	29.71	167.11

La tabla 5.19 muestra cómo varían R_{SHE} y R_{SHSUB} al ajustar x_j . Al aplicar la Ec. (3.11) con una resistividad de $5 \Omega \cdot \text{cm}$ para el sustrato, el grosor t_{sub} se modificará en función de la profundidad de la unión y , en consecuencia, R_{SHSUB} cambiará.

La obtención de R_{SHUB} mediante la técnica de cuatro puntas permite determinar la resistividad del sustrato (tipo p), incluso sin formar la unión pn . La tabla 5.20 presenta una comparación entre los parámetros obtenidos experimentalmente y los cálculos teóricos obtenidos aplicando la Ec. (3.11).

Tabla 5.20
Comparación entre parámetros obtenidos experimentalmente vs teóricos.

Parámetros	Experimental	Teóricos
t_{sub}	300 μm	300 μm
ρ_{SUB}	8.7376 $\Omega \text{ cm}$	8.5 $\Omega \text{ cm}$
R_{SUB}	291.25 Ω/sq	283.33 Ω/sq

La tabla 5.20 muestra la comparación entre R_{SHSUB} obtenida experimentalmente y R_{SHSUB} calculada teóricamente. Para estos cálculos, se utilizó un valor de ρ_{SUB} de $8.5 \Omega \cdot \text{cm}$, generando una discrepancia en R_{SHSUB} de menos del 3%. No obstante, es evidente que la aplicación de la Ec. (3.11) es efectiva para calcular R_{SH} en situaciones donde el sustrato está dopado de manera uniforme.

Utilizando la resistividad experimental, se realizaron cálculos para los componentes de la resistencia en serie (R1-R7), considerando tanto R_{SH} para cada lado de la celda como R_{SHSUB} y R_{SHE} para el sustrato y el emisor, respectivamente. Estos cálculos toman en cuenta que estos componentes se ven afectados por la profundidad de la unión en cada proceso. La Tabla 5.21 presenta los resultados obtenidos para cada uno de estos componentes.

Se observa que R_{SHSUB} y R_{SHE} varían con la profundidad de la unión, impactando directamente en los componentes dependientes de estos parámetros.

Tabla 5.21.
Cálculo de componentes de R_s .

$x_j = 0.87 \mu m$		
Componentes de R_s	Valor	Unidades
R1	4.8 e-3	Ω
R2	6.8854	Ω
R3	1.9443e-9	Ω
R4	1.0727	Ω
R5	0.4250	Ω
R6	0.4656	Ω
R7	144e-6	Ω

$x_j = 0.75 \mu m$		
Componentes de R_s	Valor	Unidades
R1	4.8 e-3	Ω
R2	6.004	Ω
R3	1.9451e-9	Ω
R4	1.1804	Ω
R5	0.6091	Ω

$x_j = 0.70 \mu m$		
Componentes de R_s	Valor	Unidades
R1	4.8e-3	Ω
R2	5.9140	Ω
R3	1.9454e-9	Ω
R4	1.6133	Ω
R5	0.7931	Ω

$x_j = 0.60 \mu m$		
Componentes de R_s	Valor	Unidades
R1	4.8e-3	Ω
R2	5.4271	Ω
R3	1.9461-9	Ω
R4	1.94	Ω
R5	0.9771	Ω

R3 no está directamente vinculado a R_{SHSUB} , pero depende del grosor de la región p (t_{SUB}), cuyo valor se modifica de acuerdo a la profundidad del emisor, entre $0.87 \mu\text{m}$ y $0.60 \mu\text{m}$.

R1, R6 y R7, en función de la geometría de la rejilla y el grosor del conductor, permanecen inalterados con cambios en R_{SH} . Su resistencia se mantiene constante y solo se presenta en la primera sección de la tabla 5.21 para una profundidad de $0.87 \mu\text{m}$.

La tabla 5.21 muestra cómo varía la resistencia en serie con la profundidad de la unión, confirmando que una disminución en x_j resulta en una reducción en la resistencia en serie, lo que demuestra la influencia de R_{SH} en el R_s total.

R4, R5 y R6 se simplifican en R_{S1-10} al aplicar las Ec. (5.2) y Ec. (5.3), obteniendo R_{Eq} . La tabla 5.22 detalla los valores de cada R_{Eq} para diversas profundidades de unión, siendo esta resistencia crucial para calcular la resistencia en serie total (R_s) de la celda mediante la Ec. (5.3).

Tabla 5.22
Comparación de R_s teórico vs. R_s del método de extracción de parámetros.

η (%)	x_j (μm)	R_s (Ω) Teórico	R_s (Ω) Método propuesto	Diff (%)
5.8	0.87	8.261	8.823	-6.81
6.5	0.75	7.803	6.707	14.04
7.1	0.70	7.380	6.707	9.11
8.2	0.60	6.944	5.897	15.07

Los resultados obtenidos en el cálculo de la resistencia en serie, presentados en la tabla 5.22, se complementan con la resistencia en serie obtenida a través del método propuesto (figuras 5.22 - 5.25). La tabla mencionada anteriormente también muestra la diferencia porcentual entre los cálculos y el método de extracción de parámetros.

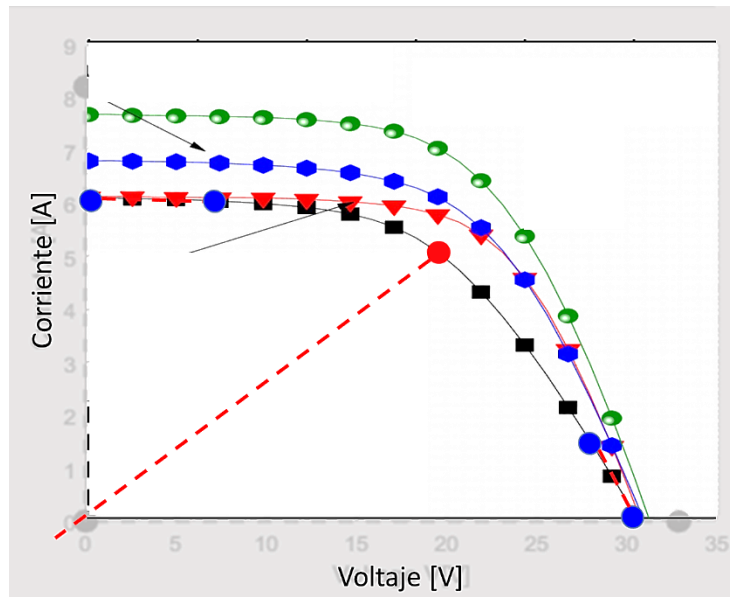


Figura 5.22. Extracción de parámetros para curva I-V con $x_j = 0.87 \mu\text{m}$.

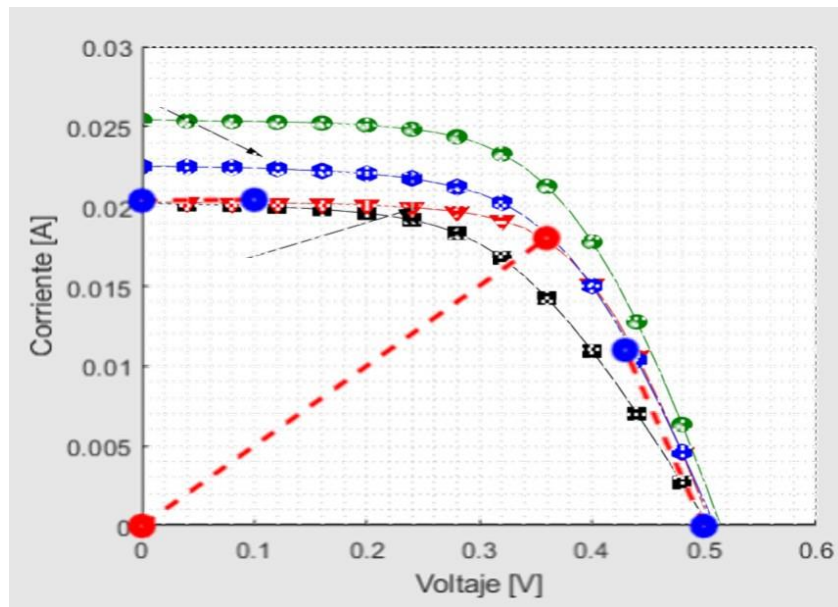


Figura 5.23. Extracción de parámetros para curva I-V con $x_j = 0.75 \mu\text{m}$.

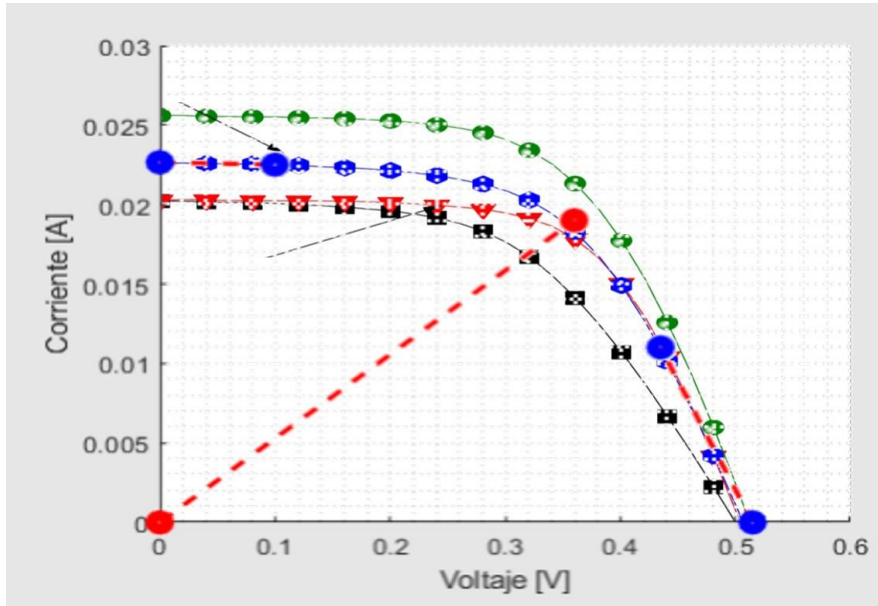


Figura 5.24. Extracción de parámetros para curva I-V con $x_j = 0.70 \mu\text{m}$.

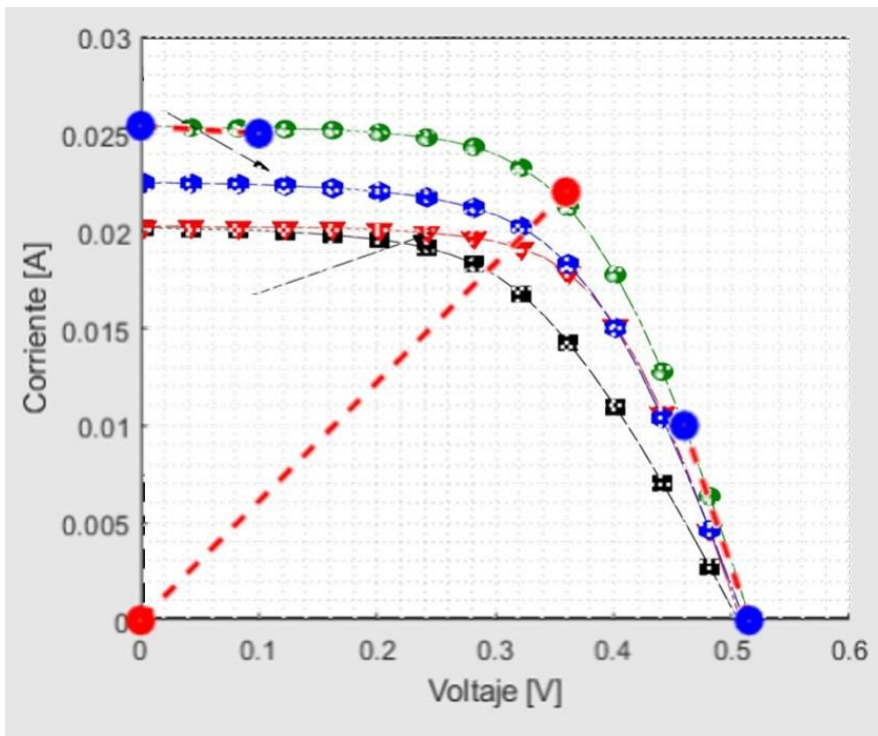


Figura 5.25. Extracción de parámetros para curva I-V con $x_j = 0.60 \mu\text{m}$.

La tabla 5.22 indica que, en cada caso, la eficiencia aumenta y la resistencia en serie tiende a disminuir, de acuerdo con la teoría expuesta en el **capítulo 3** de este trabajo. Aunque las diferencias entre R_s teórica y la obtenida por la extracción de parámetros pueden parecer "altas", esto podría deberse a las condiciones bajo las cuales se obtuvieron o caracterizaron las celdas para la curva I-V. No obstante, se demuestra que el cálculo de R_s sigue un comportamiento similar al modelo de extracción de parámetros.

Con el propósito de validar los cálculos realizados para la obtención de R_s , las celdas solares con variaciones de x_j fueron medidas nuevamente. El objetivo es obtener los parámetros de desempeño y aplicar el método de extracción, donde se obtendrá R_s a partir de la curva experimental. Finalmente, se determinará en qué zona de la curva I-V se hace más evidente su influencia, al establecer una comparación con los cálculos realizados.

La figura 5.26 muestra que para la celda solar con $x_j = 0.87 \mu\text{m}$, se seleccionaron dos regiones de interés, una a 10 mA (a) y otra para 5 mA (b). Esto mismo fue aplicado para las otras celdas solares con diferente x_j .

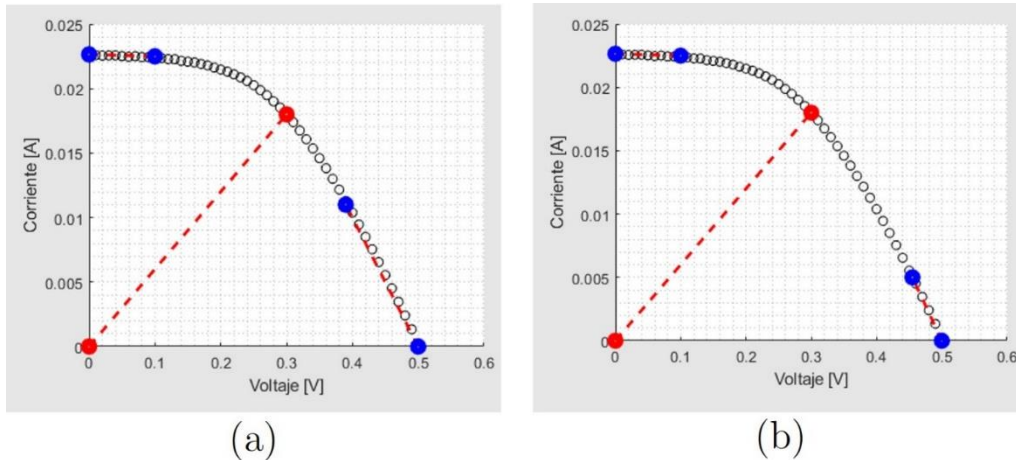


Figura 5.26. Selección de ROI, para el cálculo de R_s ,
(a) ubicación de punto a 10 mA, (b) ubicación de punto a 5 mA.

Los valores de R_s obtenidos para cada zona y para cada celda solar definida por x_j respectiva, se muestran en la tabla 5.23, donde se calcula la diferencia (Diff) entre las dos zonas seleccionadas, con respecto a los cálculos realizados en apartados anteriores.

Para R_p , no se llevaron a cabo estas pruebas, ya que para este parámetro es más evidente la pendiente en la rama de I_{sc} , lo que permite determinarlo de forma directa.

Tabla 5.23

Comparación de R_s teórico vs. R_s obtenida en la zona de 10 y 5 mA

x_j (μm)	R_s (Ω) Teórico	R_s (Ω) zona a 10 mA	R_s (Ω) zona a 5 mA	Diff (1)	Diff (2)
0.87	8.261	9.5	8.4	-15.00	-1.68
0.75	7.803	8.4	8.1	-7.65	-3.81
0.70	7.380	8.1	7.6	-9.76	-2.98
0.60	6.944	8	7.2	-15.21	-3.69

La tabla anterior muestra, en general, que las zonas ubicadas en 5 mA presentan una mejor aproximación, con un error por debajo del 4%, en comparación con los cálculos realizados. Esto sugiere que es en esa zona donde se manifiesta de forma más clara la influencia de R_s y donde podría calcularse o extraerse, según corresponda.

Este mismo estudio se realizó para las curvas presentadas en [9], seleccionando las mismas zonas (figura 5.27), con el fin de verificar que, en la zona de 5 mA, es donde se hace presente la influencia de R_s .

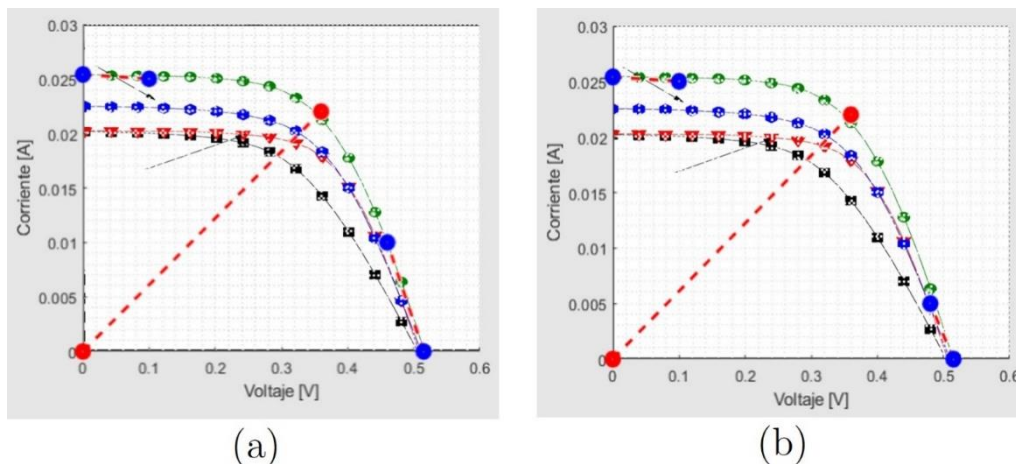


Figura 5.27. Selección de zona para extracción de R_s en imagen de curvas tomada de [9], (a) ubicación en 10 mA y (b) ubicación en 5 mA.

Al seleccionar las regiones de interés como se muestra en la figura anterior, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 5.24.

Tabla 5.24

Comparación de R_s teórico vs. R_s obtenida en la zona de 10 y 5 mA en imagen de curvas.

x_j (μm)	R_s (Ω) Teórico	R_s (Ω) zona a 10 mA	R_s (Ω) zona a 5 mA	Diff (1)	Diff (2)
0.87	8.261	8	8	3.16	3.16
0.75	7.803	6.2	6	20.54	23.11
0.70	7.380	6.2	6	15.99	18.70
0.60	6.944	5.1	5	26.56	28.00

La tabla anterior indica que, al posicionar la región de interés en diferentes zonas, no se observan cambios significativos en la pendiente. Esto podría atribuirse a la influencia de la temperatura durante la caracterización de las celdas, al obtener la curva I-V y los parámetros de desempeño.

5.6. Trazado de curvas simuladas para la validación de parámetros obtenidos en la extracción.

Una vez identificadas las zonas para determinar el valor de R_s , es imperativo verificar que los parámetros calculados puedan reproducir una curva I-V simulada con una adecuada aproximación, ya sea en comparación con la curva experimental o la imagen de la curva proporcionada por el fabricante. Con este propósito, se desarrolló una herramienta de software (Figura 5.28) que permite ingresar los cinco parámetros que describen el modelo de un diodo (I_{PV} , I_0 , R_s , R_p y n) con el fin de reproducir la curva I-V mediante la siguiente ecuación.

$$I = -\left(\frac{V}{R_s R_p}\right) - \frac{\left(W\left(\frac{R_s R_p I_0 e^{\left(\frac{R_p(R_s I_{PV} + R_s I_0 + V)}{a(R_s + R_p)}\right)}}{a(R_s + R_p)}\right)\right) a}{R_s} + \frac{R_p(I_0 + I_{PV})}{R_s + R_p} \quad (5.11)$$

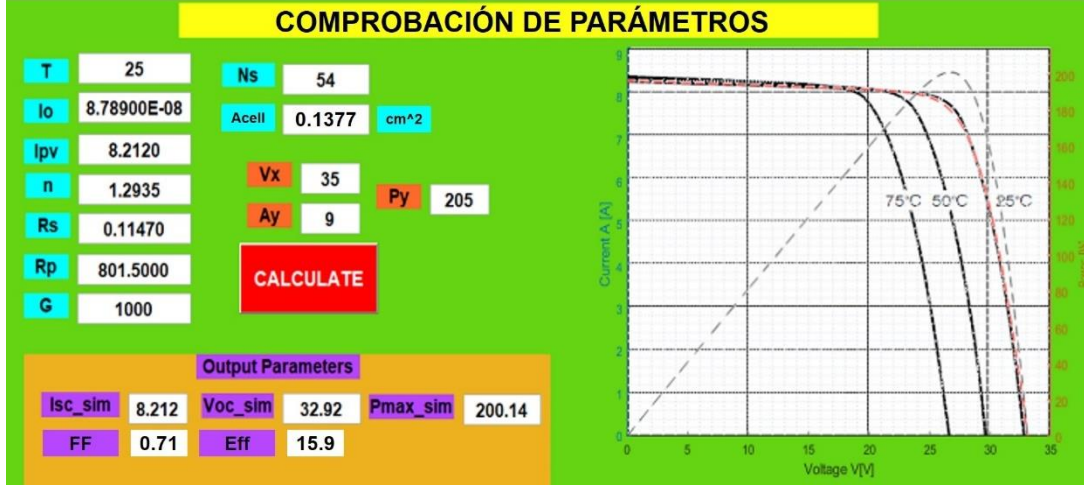


Figura 5.28. Herramienta de software usada para trazar curva I-V simulada, a partir de los parámetros obtenidos en la extracción.

Al trazar la curva I-V simulada, es factible extraer nuevamente los parámetros de desempeño, tales como $I_{SC,SIM}$, $V_{OC,SIM}$, $P_{MAX,SIM}$, FF_{SIM} y Eff_{SIM} , utilizando las ecuaciones 3.1-3.4. Es importante señalar que, para obtener $V_{OC,SIM}$, se aplica la Ec. (3.2), multiplicando el resultado por el número de celdas (N_s), considerando así si se trata de una celda individual o un panel de acuerdo a la Ec. (5.12).

$$V_{OC,SIM} = V_{OC} * N_s \quad (5.12)$$

Obtener los parámetros de desempeño de la curva simulada facilita una comparación más precisa con los valores proporcionados por el fabricante o la curva experimental. Cabe mencionar que el método propuesto se basa en el análisis de imágenes, y, por lo tanto, no se considera viable calcular el error mediante métricas como NRMSE o RMSE, ya que estas realizan comparaciones punto a punto para las cuales no se tiene acceso directo en este enfoque.

5.6.1. Celda solar RTC France [90].

Como se ha mencionado en secciones anteriores, se realizaron estudios para identificar la región donde la presencia de R_s es más evidente. Se determinó que ésta se encuentra

en el 10% final de la corriente en la rama de V_{OC} . Para comprobar esta afirmación, se extraerán nuevamente los parámetros de la celda RTC France (Figura 5.29) y se obtendrá la curva simulada a partir de dichos parámetros (Figura 5.30).

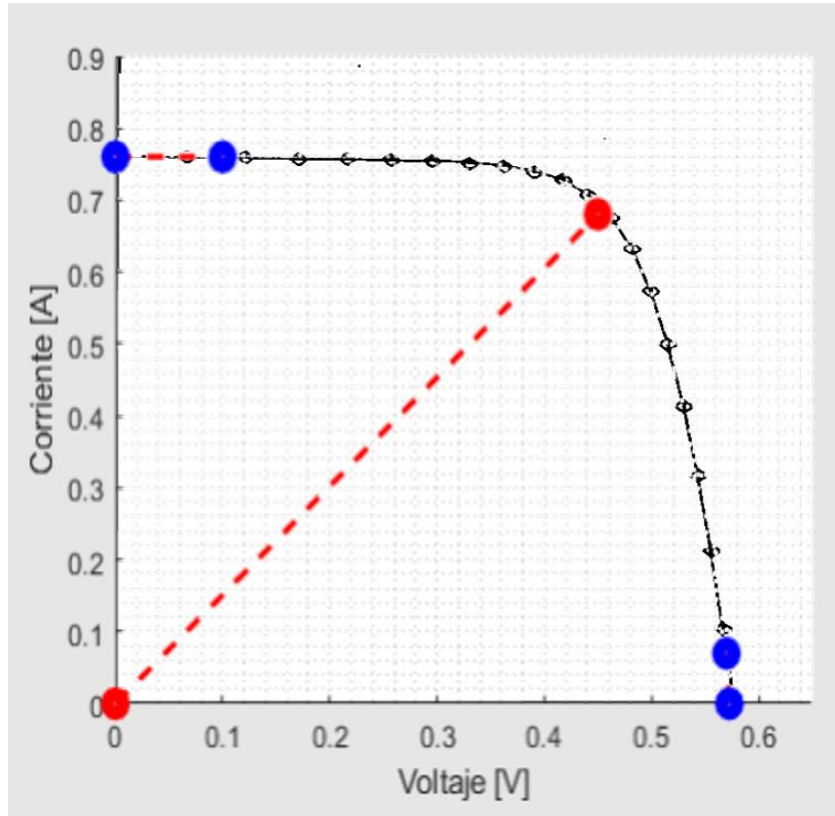


Figura 5.29. Ubicación de regiones de interés en imagen de curva de celda RTC France [90].

Las regiones de interés (ROI), ubicadas en la figura anterior, muestran que, para extraer R_s directamente de la curva, esta se localiza a 20 mA en la rama de V_{OC} . En [90], se indica una temperatura de 33 °C y una potencia radiante de 1000 W/m², sin embargo, al obtener los parámetros de desempeño y la curva simulada (figura 5.30), se aprecia una diferencia considerable.

En la figura 5.30, es evidente una diferencia entre la curva simulada y la proporcionada por el fabricante, por lo que se modifica la temperatura a 25 °C, como si la curva de referencia estuviera en STC, obteniendo la curva mostrada en la figura 5.31, donde se aprecia una mejor aproximación entre la curva simulada (línea roja) y la curva del fabricante.

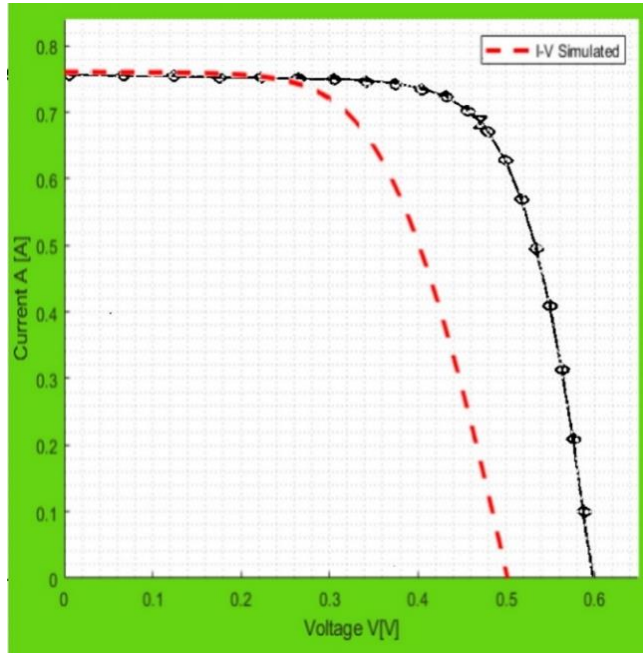


Figura 5.30. Trazado de curva simulada, para celda RTC France, a partir de los parámetros obtenidos en la extracción.

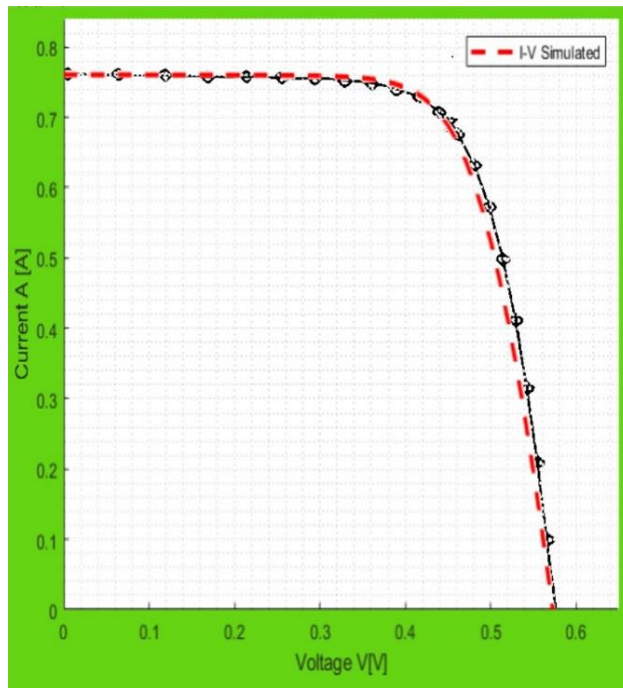


Figura 5.31. Trazado de curva simulada a 25 °C (línea roja), comparada con la curva del fabricante.

Al considerar una temperatura de 25 °C, los parámetros calculados en la extracción experimentan modificaciones sustanciales, como se detalla en la tabla 5.25, que compara los parámetros obtenidos a 33 °C con los obtenidos a 25 °C. Además, la tabla 5.26 presenta los parámetros de desempeño obtenidos para cada temperatura.

En ambas tablas, se observan diferencias notables al comparar las condiciones de 33 °C y 25 °C, afectando directamente a I_o y, por ende, al V_{OC} y n . Este efecto concuerda con la teoría [74] y lo expuesto en el capítulo 4.

Tabla 5.25.

Extracción de parámetros para celda RTC France a 33 °C y 25 °C.

Parámetros	33 °C	25 °C	Diff (%)
I_{PV} (A)	0.7605	0.7605	0.00
I_o (A)	2.80e-06	1.04e-08	-
R_s (Ω)	0.075	0.075	0
R_p (Ω)	333.33	333.33	0.00
N	1.52	1.1545	24.05

Tabla 5.26.

Parámetros de desempeño para celda RTC France a 33 °C y 25 °C.

Parámetros	33 °C	25 °C	Diff (%)
I_{SC} (A)	0.7605	0.7605	0.00
V_{OC} (V)	0.5016	0.5728	-14.19
$P_{MAX,SIM}$ (W)	0.2273	0.3102	-36.47
FF	0.5	0.71	-42.00
Eff (%)	2.27	3.1	-36.56

5.6.2. Panel solar KC200GT Kyocera [84].

Continuando con la validación del método propuesto, se analiza el panel solar comercial KC200GT de Kyocera, compuesto por 54 celdas solares de poli-Si y consta de 54 unidades. Se identifican las regiones de interés con base en la zona donde se estimó la mayor presencia de R_s . Los datos de entrada se toman de la tabla 4.1, y los parámetros obtenidos se presentan en la tabla 5.27.

La tabla 5.27 muestra los parámetros obtenidos en la extracción. Dado que la imagen de la curva proporcionada por el fabricante (figura 5.2) muestra el comportamiento del panel a 25 °C, 50 °C y 75 °C, se extraen los parámetros para cada una de estas temperaturas. La tabla refleja cambios significativos en los parámetros para cada temperatura, siendo los más evidentes en I_0 , n y R_s . La Diferencia 1 (Tabla 5.27) se establece entre 25 °C y 50 °C, donde I_0 muestra el cambio más relevante en dos órdenes de magnitud. Por otro lado, la Diferencia 2 se establece entre 25 °C y 75 °C, donde nuevamente I_0 muestra el cambio más notable en tres órdenes de magnitud.

En la tabla 5.28, se presentan los parámetros de desempeño obtenidos de las curvas simuladas trazadas para cada temperatura (Figura 5.32 - 5.34), manteniendo en 1000 W/m² la potencia radiante. En dicha tabla, se observa que el factor más afectado en primera instancia es el V_{OC} ; sin embargo, al disminuir este parámetro, la $P_{MAX,SIM}$ también disminuye, afectando consecuentemente la eficiencia del dispositivo.

Tabla 5.27.

Extracción de parámetros para panel Kyocera a 25 °C, 50 °C y 75 °C.

Parámetros	25 °C	50 °C	75 °C	Diff1 (%)	Diff2 (%)
I_{PV} (A)	8.212	8.212	8.212	0	0
I_0 (A)	8.789e-8	3.7e-06	2.7e-05	-	-
R_s (Ω)	0.11470	0.08	0.12	30.25	-4.62
R_p (Ω)	801.5	700	700	12.66	12.66
N	1.2935	1.363	1.315	-5.37	-1.66

Tabla 5.28.

Parámetros de desempeño de panel Kyocera obtenidos para 25 °C, 50 °C y 75 °C.

Parámetros	25 °C	50 °C	75 °C	Diff1 (%)	Diff2 (%)
I_{SC} (A)	8.212	8.212	8.212	0	0
V_{OC} (V)	32.89	29.9	26.89	9.09	18.24
$P_{MAX,SIM}$ (W)	200.14	181.39	155.329	9.37	22.39
FF	0.741	0.7387	0.703	0.31	5.13
Eff (%)	14.69	13.31	11.40	9.39	22.40

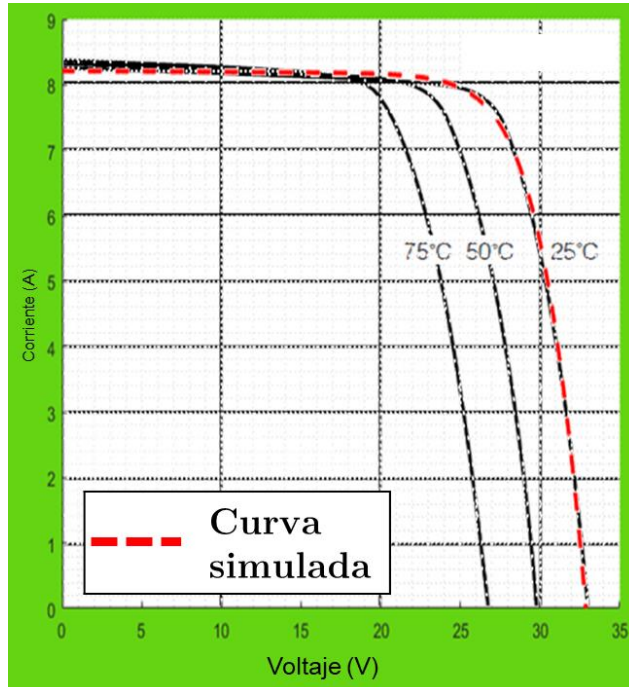


Figura 5.32. Curva simulada (línea roja), para el panel Kyocera, a partir de parámetros extraídos a 25 °C.

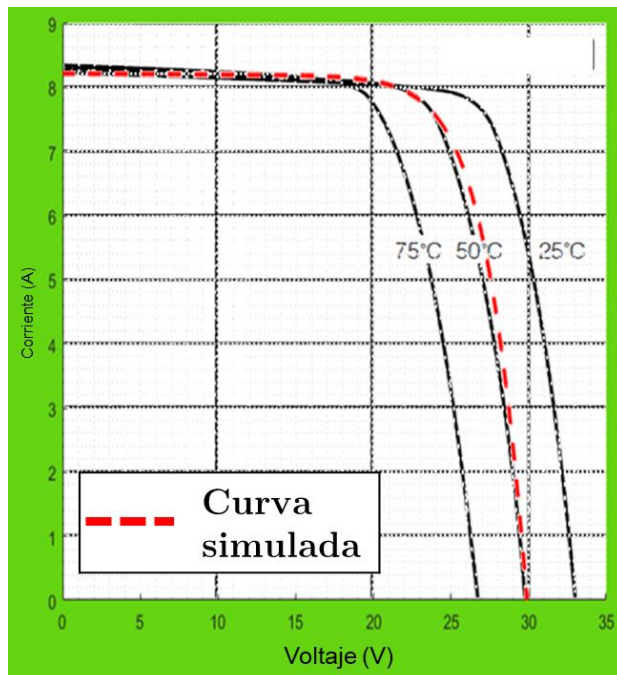


Figura 5.33. Curva simulada (línea roja), para el panel Kyocera, a partir de parámetros extraídos a 50 °C.

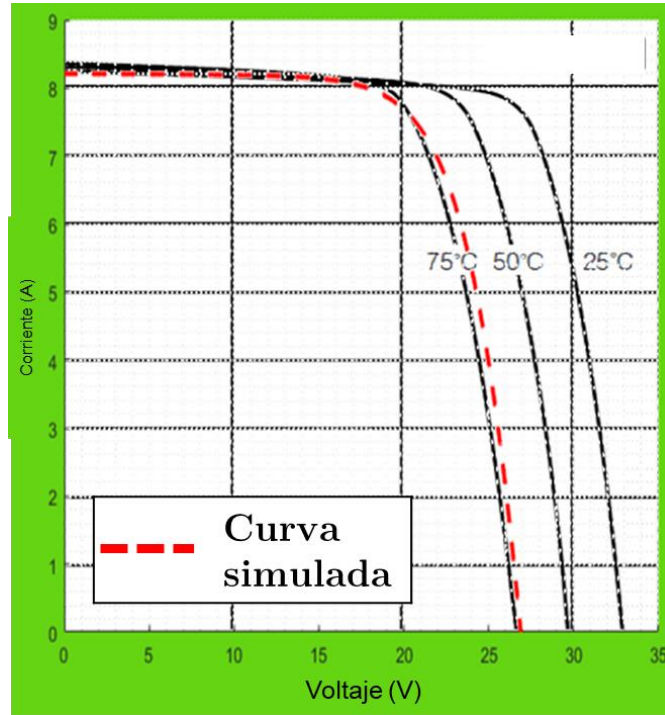


Figura 5.33. Curva simulada (línea roja), para el panel Kyocera, a partir de parámetros extraídos a 75 °C.

Dado que el fabricante proporciona la imagen de la curva variando la potencia radiante (G), también se analizó el comportamiento del método propuesto bajo estas condiciones. Para este análisis, la temperatura (T) se mantiene en 25 °C y se modifica G : (a) 800 W/m², (b) 600 W/m², (c) 400 W/m² y (d) 200 W/m², para obtener las curvas simuladas en dichas condiciones (Figura 5.33-5.36).

En la tabla 5.29, se muestra cómo cambian I_{SC} , $P_{MAX,SIM}$ y la eficiencia (Eff), siendo estos los parámetros de desempeño más afectados al experimentar variaciones en la potencia radiante (G).

Tabla 5.29.

Parámetros de desempeño más sensibles a las variaciones de potencia radiante (G).

Parámetros	I_{SC} (A)	$P_{MAX,SIM}$ (W)	Eff (%)
800 (W/m ²)	6.57	161.57	16.1
600 (W/m ²)	4.92	119.78	11.91
400 (W/m ²)	3.28	7.39	7.73
200 (W/m ²)	1.64	36.47	3.64

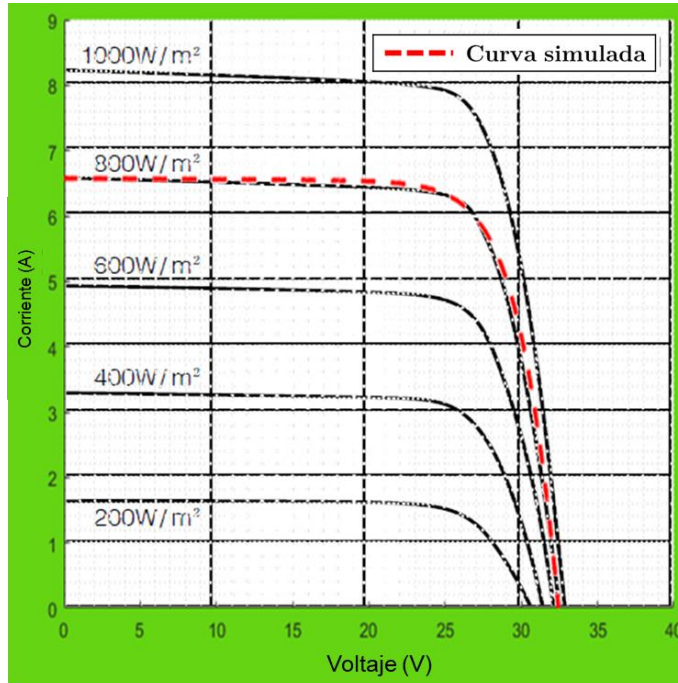


Figura 5.33. Curvas del fabricante (línea negra) y simulada (línea roja), para una potencia radiante $(G) = 800 \text{ W/m}^2$, para el panel Kyocera.

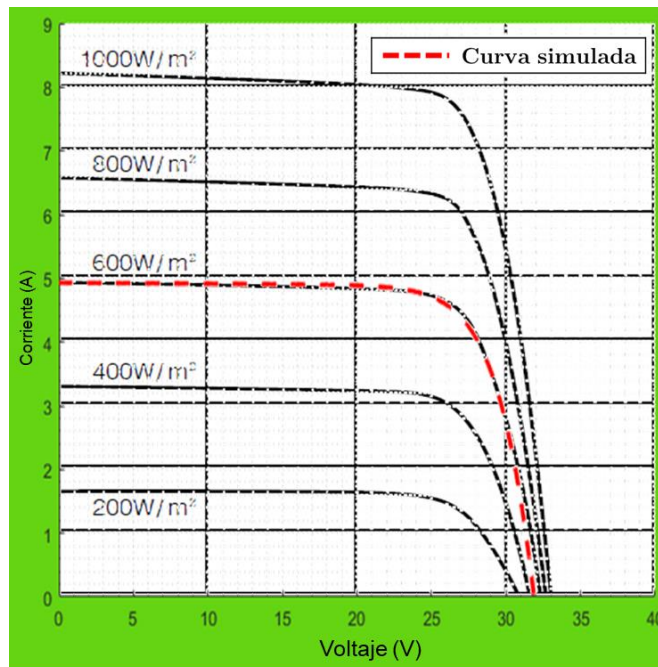


Figura 5.34. Curvas del fabricante (línea negra) y simulada (línea roja), para una potencia radiante $(G) = 600 \text{ W/m}^2$, para el panel Kyocera.

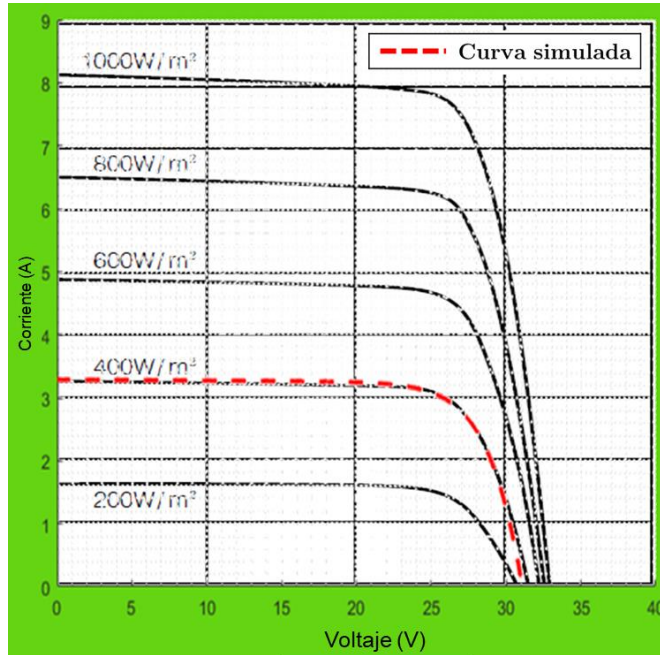


Figura 5.35. Curvas del fabricante (línea negra) y simulada (línea roja), para una potencia radiante ($G = 400 \text{ W/m}^2$), para el panel Kyocera.

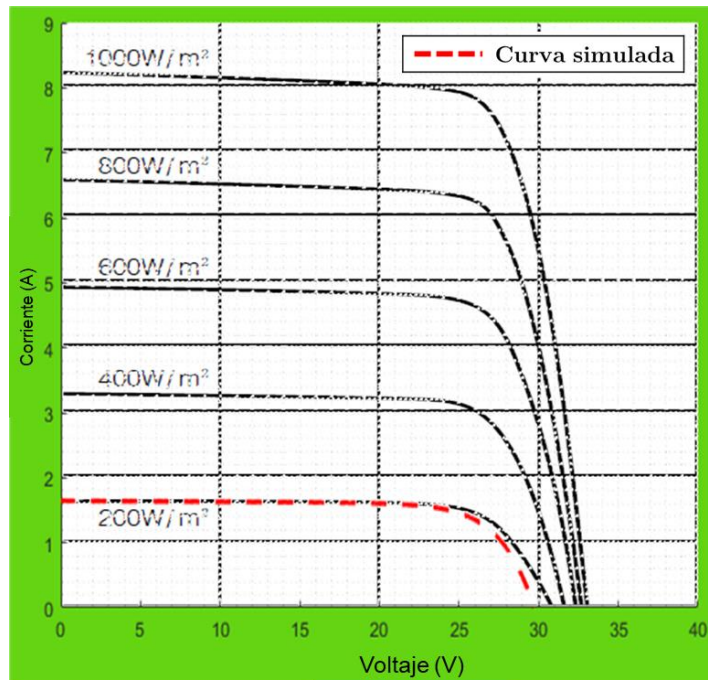


Figura 5.36. Curvas del fabricante (línea negra) y simulada (línea roja), para una potencia radiante ($G = 400 \text{ W/m}^2$), para el panel Kyocera.

5.6.3. Panel solar SP-144M [91].

Considerando un panel de "nueva generación", se estudió el comportamiento del panel SP-144M, utilizando la hoja de datos proporcionada por el fabricante para obtener la imagen de la curva I-V. Se seleccionaron las regiones de interés de acuerdo a lo establecido en apartados anteriores, y los resultados de la extracción se presentan en la tabla 5.30.

Tabla 5.30.

Extracción de parámetros de panel SP-144M a 25 °C, 50 °C y 75 °C.

Parámetros	25 °C	50 °C	75 °C	Diff1 (%)	Diff2 (%)
I_{PV} (A)	11.63	11.63	11.63	0	0
I_O (A)	9.95e-05	4.84e-04	9.84e-04	-	-
R_s (Ω)	0.15	0.18	0.135	30.25	-4.62
R_p (Ω)	166.667	150	100	12.66	12.66
N	1.155	1.363	1.055	-5.37	-1.66

La tabla 5.31 muestra los parámetros obtenidos en la extracción, manteniendo una irradiancia en condiciones estándar de prueba (STC). Sin embargo, el fabricante presenta nuevamente la curva I-V en variaciones de temperatura de 25, 50 y 75 °C, lo cual permite obtener los parámetros para cada condición.

Tabla 5.31.

Parámetros de desempeño de panel SP450M para 25 °C, 50 °C y 75 °C.

Parámetros	25 °C	50 °C	75 °C	Diff1 (%)	Diff2 (%)
I_{SC} (A)	11.63	11.63	11.63	0.00	0.00
V_{OC} (V)	49.86	45.57	42.68	8.60	14.40
$P_{MAX,SIM}$ (W)	450	342.521	310.419	23.88	31.02
FF	0.776	0.645	0.625	16.88	19.46
Eff (%)	22.68	17.26	15.65	23.90	31.00

Los parámetros de desempeño obtenidos al trazar la curva simulada a 25 °C (Figura 5.37), 50 °C (Figura 5.38) y 75 °C (Figura 5.39) se muestran en la tabla 5.31 para cada temperatura mencionada anteriormente.

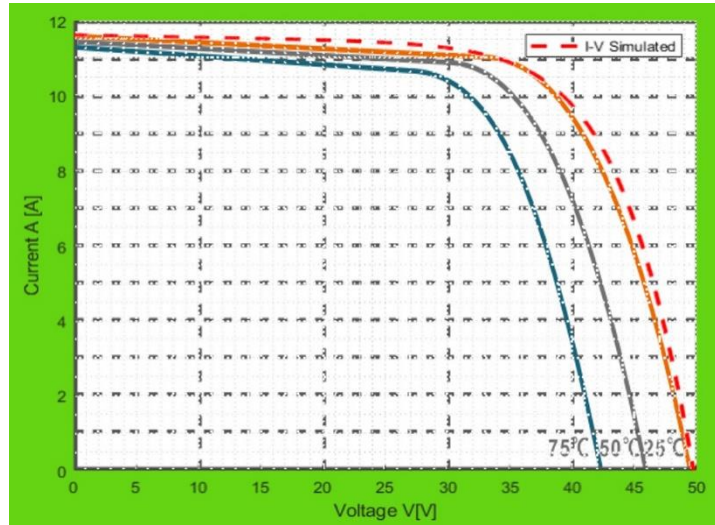


Figura 5.37. Trazo de curva simulada (línea roja), para panel SP-144M en STC.

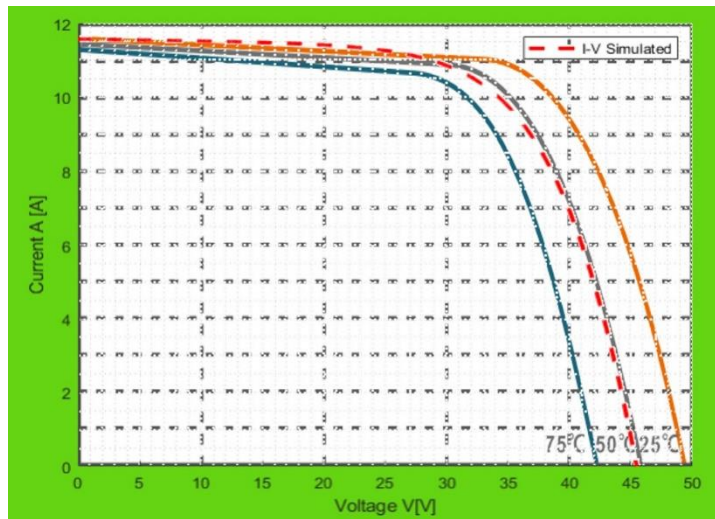


Figura 5.38. Trazo de curva simulada (línea roja), para panel SP-144M con $T = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

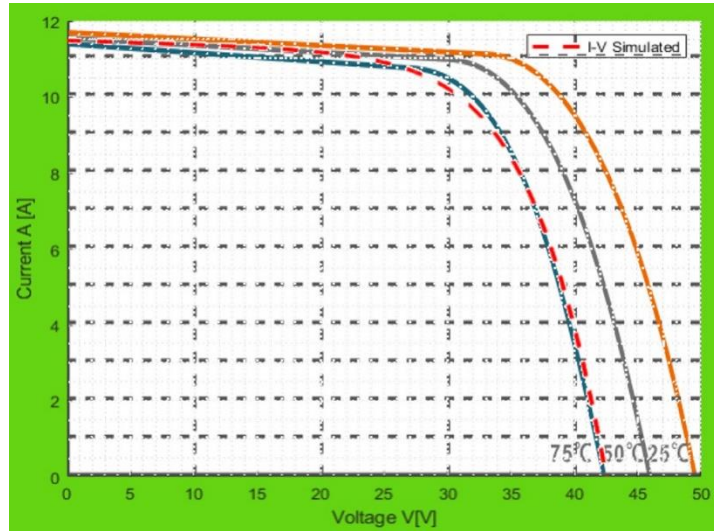


Figura 5.39. Trazo de curva simulada (línea roja), para panel SP450M con $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la tabla 5.31 se muestra que, para cada temperatura, se presentan variaciones significativas en los parámetros de desempeño, siendo la eficiencia del dispositivo (Eff) la más notable. Por esta razón, en la producción de energía solar, se implementan seguidores del punto de máxima potencia (MPPT) para contrarrestar los efectos negativos de la temperatura y la irradiancia, aunque estos aspectos se encuentran fuera del alcance de los temas centrales del presente trabajo.

5.6.4. Celdas solares fabricadas en INAOE.

La última etapa de la validación de la metodología propuesta se centra en la extracción de parámetros y trazado de curvas para las celdas fabricadas en INAOE, con el fin de verificar la aplicabilidad de la metodología desarrollada a lo largo de este trabajo para simular tanto curvas de paneles solares como celdas individuales, en este caso a nivel de oblea.

Se extrajeron los parámetros para las celdas solares obtenidas en los procesos presentados en el apartado 5.5.1. Cada proceso de fabricación está definido por una profundidad de unión (x_j , ver tabla 5.15). En la tabla 5.32 se presentan los resultados obtenidos en la extracción de parámetros para cada celda solar con respecto a la x_j .

Al trazar las curvas de las celdas definidas por su correspondiente x_j (figuras 5.40-5.43), se extrajeron los parámetros de desempeño para compararlos directamente con los obtenidos por el simulador solar (ver tabla 5.33).

Tabla 5.32.

Extracción de parámetros para celdas INAOE de acuerdo a x_j .

Parámetros	87 (μm)	75 (μm)	70 (μm)	60 (μm)
I_{PV} (A)	22.8e-03	22.9e-03	25.8e-03	28.9e-03
I_o (A)	1.5023e-09	5.6592e-09	1.4586e-09	4.5355e-09
R_s (Ω)	8.4	8.1	7.6	7.2
R_p (Ω)	600	600	1.056	1.295
n	1.167	1.31	300	1000
T (C)	28°	28°	29°	29°
G	1000	1000	1000	1000

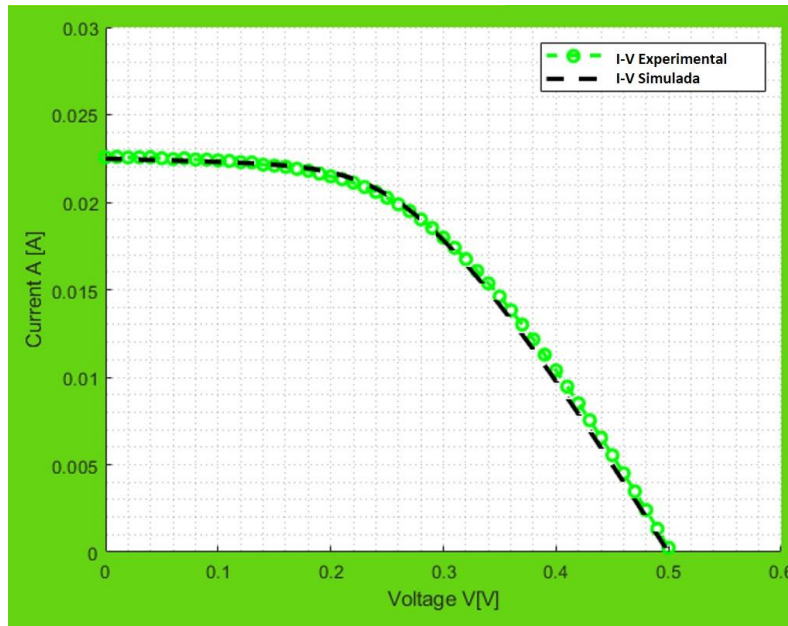


Figura 5.40. Comparación entre curva experimental (verde) y curva simulada (línea punteada negra) para una celda solar con $x_j = 0.87 \mu\text{m}$.

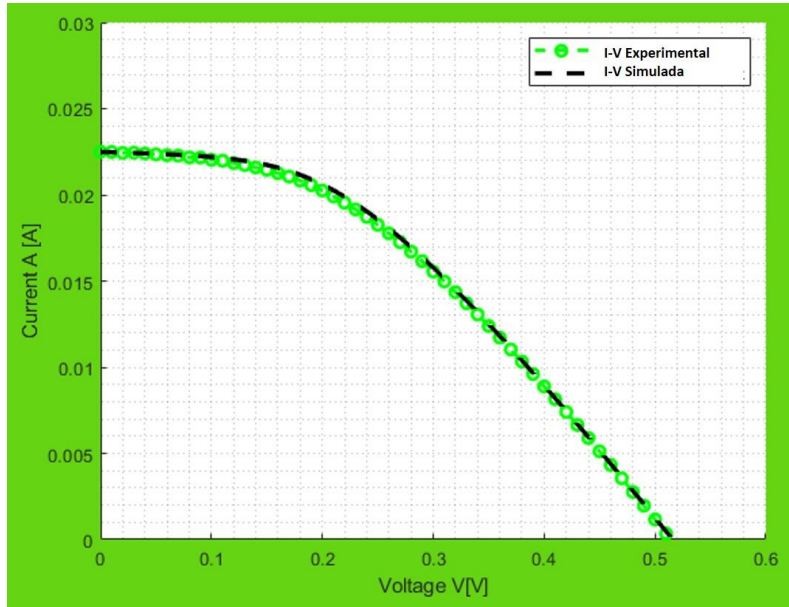


Figura 5.41. Trazo de curva simulada (línea punteada negra, en comparación con curva experimental (línea verde) para una celda solar con $x_j = 0.75 \mu\text{m}$.

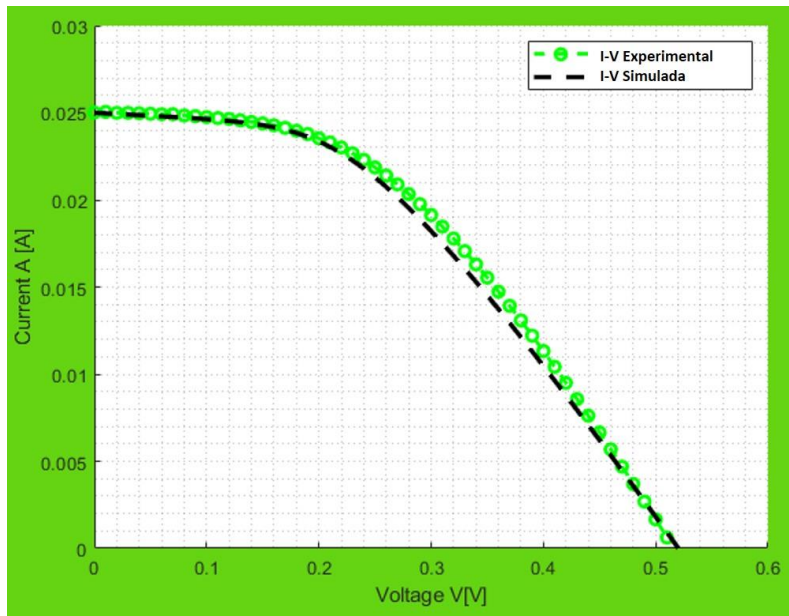


Figura 5.42. Trazo de curva simulada (línea punteada negra), en comparación con la curva experimental (línea verde), para una celda solar con $x_j = 0.70 \mu\text{m}$.

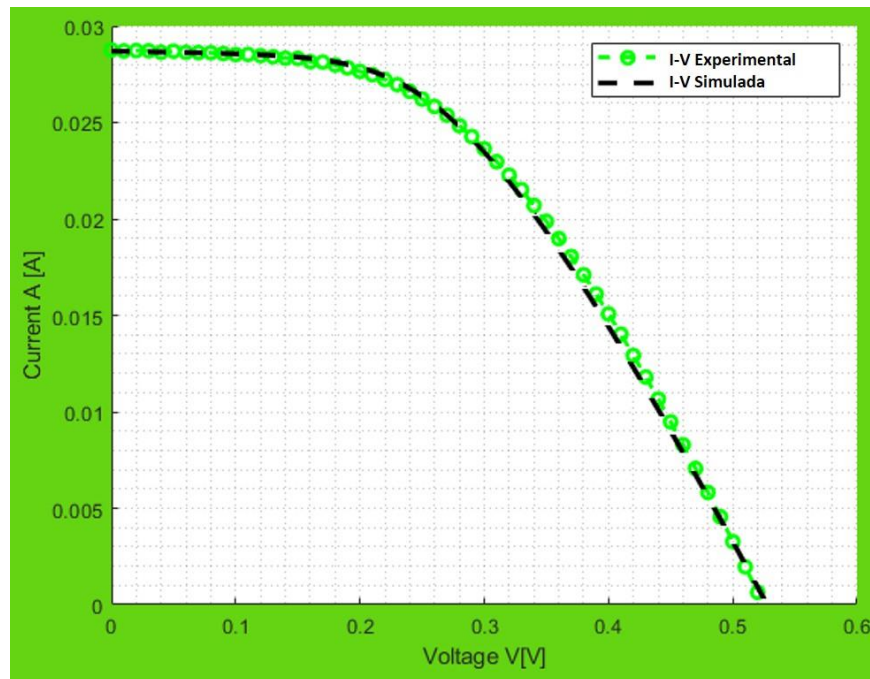


Figura 5.43. Comparación entre curva experimental (línea verde) y curva simulada (línea punteada negra), para una celda solar con $x_j = 0.60 \mu\text{m}$.

Tabla 5.33.
Cálculo de componentes de R_s .

$x_j = 0.87 \mu m$			
Parámetros	Simulador Solar	Método Propuesto	Diff (%)
V_{OC} (A)	0.500	0.500	0.00
I_{SC} (V)	22.51e-03	22.8e-03	-1.29
$P_{MAX,SIM}$ (W)	5.394e-03	5.392e-3	0.04
FF	0.478	0.468	2.09
Eff (%)	5.393	5.35	0.80
$x_j = 0.75 \mu m$			
Parámetros	Simulador Solar	Método Propuesto	Diff (%)
V_{OC} (A)	0.510	0.517	-1.37
I_{SC} (V)	22.57e-03	22.9e-03	-1.46
$P_{MAX,SIM}$ (W)	4.684e-03	4.70e-03	-0.34
FF	0.408	0.400	1.96
Eff (%)	4.684	4.750	-1.41
$x_j = 0.70 \mu m$			
Parámetros	Simulador Solar	Método Propuesto	Diff (%)
V_{OC} (A)	0.520	0.522	-0.38
I_{SC} (V)	25.01e-03	25.83e-03	-3.28
$P_{MAX,SIM}$ (W)	5.741e-03	5.478e-03	4.58
FF	0.441	0.401	9.07
Eff (%)	5.740	5.478	4.56
$x_j = 0.60 \mu m$			
Parámetros	Simulador Solar	Método Propuesto	Diff (%)
V_{OC} (A)	0.520	0.528	-1.54
I_{SC} (V)	28.76e-03	28.90e-03	-0.49
$P_{MAX,SIM}$ (W)	7.126e-03	7.04e-03	1.21
FF	0.476	0.461	3.15
Eff (%)	7.125	7.044	1.14

La comparación entre los parámetros de desempeño revela diferencias aceptables. Dado que se trata de un dispositivo a nivel de oblea, varios factores siguen influyendo tanto en la fabricación como en la caracterización. No obstante, la metodología propuesta sirve como base para buscar mejoras en los procesos mencionados anteriormente.

5.7. Discusión de resultados.

En los apartados anteriores, el método propuesto se validó mediante diferentes dispositivos, obteniendo curvas simuladas y parámetros de desempeño a partir de los parámetros de extracción. Se estudiaron tanto dispositivos comerciales como dispositivos solares fabricados en el INAOE. Sin embargo, además de esto, es esencial comparar los resultados obtenidos con lo reportado en la literatura.

La Tabla 5.34 presenta una comparación directa de los parámetros obtenidos para el modelo de un solo diodo, utilizando diferentes métodos reportados en la literatura y el método propuesto en el presente trabajo, para la celda solar RTC France.

Tabla 5.34.
Extracción de parámetros reportados en la literatura para la celda solar
RTC France

Método	Autor	I_o (A)	I_{PV} (A)	n	R_s (Ω)	R_p (Ω)
NMA	Easwarakhanthan (1986), [90]	3.22E-07	0.7608	1.483	0.036	53.763
PSO	Ye M (2009) [97]	3.23E-07	0.7608	1.483	0.036	53.796
LM (RF#1)	Laudani (2014) [98]	3.50E-09	0.7641	1.134	0.045	11.103
ACPSBOP	Cubas (2017) [99]	2.92E-06	0.7606	1.740	0.045	246.785
GO	Ben aribia (2023) [100]	3.23E-07	0.7607	1.481	0.036	53.718
INAOE	Propuesto (2023)	1.04E-08	0.7605	1.154	0.075	333.33

La tabla anterior evidencia que uno de los primeros enfoques utilizados para la extracción de parámetros en la celda RTC France fue propuesto por Easwarakhanthan en 1986 [90], estableciendo así una "base" de resultados para la aplicación de futuros métodos. Este impacto se refleja en los resultados obtenidos por Ye M en 2009 [97] y Ben Aribia en 2023 [100], quienes buscaron aproximarse a los parámetros reportados por el autor [90].

Sin embargo, se destaca que puede haber variaciones en la obtención de parámetros de acuerdo al sistema de ecuaciones planteado desde el inicio, como es el caso de Laudani en 2014 [98], quien consideró las variaciones de temperatura. La corriente de saturación (I_o) reportada por este autor es la más cercana en magnitud a la obtenida por el método propuesto en esta tesis, así como el factor de idealidad. No obstante, en cuanto a la resistencia en paralelo (R_p), el autor [98] se sitúa muy por debajo de otros autores y de lo que indica la teoría.

En contraste, Cubas en 2017 planteó un sistema de ecuaciones para modelar esta celda individual, obteniendo una resistencia en paralelo (R_p) a la cual se aproxima mejor el método propuesto en esta tesis. Sin embargo, este enfoque no consideró las variaciones de temperatura, al igual que [90], [97] y [100], y obtuvo valores de IO próximos a éstos.

En el ámbito de los paneles solares, uno de los más frecuentemente abordados en la literatura es el panel Kyocera KC200GT. Este ha sido objeto de estudio en la aplicación de varios métodos. La tabla 5.35 exhibe una comparación entre dichos métodos y la metodología propuesta en el presente trabajo.

Tabla 5.35.

Extracción de parámetros reportados en la literatura para el panel KC200GT.

Método	Autor	I_o (A)	I_{pv} (A)	$n1$	R_s (Ω)	R_p (Ω)
NR	Villalva (2009) [23]	9.825E-08	8.210	1.300	0.221	415.405
AF	Cubas (2014) [52]	9.760E-08	8.213	1.300	0.230	597.380
GA	Echeverria (2014) [101]	8.500E-09	8.210	1.293	0.201	213.130
WDO	Mathew (2017) [102]	4.423E-07	8.181	1.417	0.113	747.410
GA	Elezab (2018) [103]	8.789E-08	8.213	1.290	0.232	547.910
GO	Ben aribia (2023) [100]	4.318E-08	8.192	1.248	0.004	15.1039
Propuesto	Propuesto (2023)	8.789E-08	8.212	1.293	0.114	801.500

La tabla 5.35 destaca a Villalba (2009) como uno de los pioneros en investigar este dispositivo, empleando el método Newton-Raphson (NR) y obteniendo resultados aceptables en concordancia con la teoría. Sin embargo, su método se ve limitado por el factor de idealidad, ya que asigna un valor inicial de $n = 1.3$ debido a la tecnología específica de las celdas que componen el panel solar (poli-Si) [23,86]. Una situación similar ocurre con Cubas en (2014), quien también elige $n=1.3$, y los demás parámetros se aproximan a los reportados por [23]. No obstante, Cubas es uno de los primeros en reportar una corriente fotogenerada (I_{PV}) 0.04 % superior a 8.21 A, lo cual se considera un resultado aceptable. Esto se debe a que la I_{PV} representa la corriente "ideal" de la celda solar sin pérdidas, y se ve disminuida por la unión pn y las resistencias parásitas generadas por los factores descritos en secciones anteriores. Por lo tanto, el resultado obtenido por el método propuesto en esta tesis también puede considerarse como muy aceptable.

En el estudio de Mathew en (2017) [102], se informa de una $I_{PV} = 8.181$ A. Este resultado sugiere que la corriente de cortocircuito (I_{SC}) de la curva simulada sería menor o igual a la I_{PV} mencionada anteriormente. Esta situación indica que, al tener una I_{SC} con un -0.35% de diferencia, la pendiente en esta rama será menor al determinar el valor de R_p . Como resultado, se pueden obtener un valor que tienda a infinito,

conforme indica la teoría. Este hallazgo es consistente con los resultados obtenidos por el método propuesto en esta tesis y puede considerarse como aceptable, al igual que el cálculo de R_s , ya que el método propuesto se aproxima con un 0.88 % de diferencia a lo reportado por este autor.

En 2018, Elezab aplicó Algoritmos Genéticos (GA) [103] y reportó una corriente de saturación inversa (I_0) = 8.789e-08 A, a la cual el método propuesto en esta tesis se aproxima con un 0.01% de diferencia. No obstante, en comparación con Echeverría, quien también aplicó GA en 2014, reporta una I_0 con un 90.33% de diferencia con respecto a Elezab y un valor de resistencia en paralelo (R_p) con un 61.10% de diferencia con respecto a este mismo autor. Esto sugiere que pudieron elegir diferentes puntos de potencia máxima (P_{MAX}). Sin embargo, no se proporcionan parámetros de desempeño por parte de estos autores.

El caso de Ben Aribia [100], que en 2023 aplicó un algoritmo optimizador de crecimiento (GO), y del cual se muestran resultados en ambas tablas 5.34 y 5.35, sirve para mostrar cómo algunos métodos propuestos plantean un sistema de ecuaciones para modelar tanto celdas individuales como paneles solares, y al modelar paneles solares, los valores se encuentran fuera de rangos típicos o de los indicados por la teoría; sin embargo, para este caso en especial, debido a la diferencia en órdenes de magnitud entre R_s y R_p al trazar una curva simulada, esta puede aproximarse a la curva del fabricante.

Dado que los dispositivos bajo estudio podrían considerarse de tecnología antigua, y teniendo en cuenta los avances tanto en la eficiencia de las celdas solares como en las configuraciones de los paneles solares, se investigaron dispositivos de "nueva generación": el panel SP-144M y celdas fabricadas en el INAOE. Los parámetros de desempeño de estos dispositivos se extrajeron y se presentan en las tablas 5.30 y 5.32, respectivamente. A partir de estos parámetros, se generó una curva I-V simulada, lo que facilitó el cálculo de los parámetros de desempeño. Estos sirven como elementos directos de comparación con los valores proporcionados por el fabricante o derivados experimentalmente, facilitando así la estimación del error de aproximación.

En base a lo anterior, se puede concluir que los resultados obtenidos mediante el método propuesto en esta tesis son aceptables. Se ha observado que, aunque los parámetros varían y se encuentran dispersos en la literatura, existen registros próximos a los reportados en el presente trabajo de investigación.

5.8. Conclusiones.

En el presente capítulo, se ha desarrollado una metodología basada en métodos no iterativos para la extracción de parámetros del modelo de diodo único (SDM), teniendo en cuenta las variaciones de temperatura y potencia radiante. Este enfoque prescinde de la aplicación de coeficientes K_V o K_i , así como de mediciones o asignación previa de valores de inicialización, evitando limitaciones en el cálculo de ciertos parámetros del SDM.

La metodología propuesta ha sido validada mediante su aplicación en la extracción de parámetros de celdas y paneles solares comerciales, como la celda RTC France, los paneles KC200GT y el SPM-144M. Estos dispositivos, para los cuales el fabricante proporciona la imagen de la curva I-V en variaciones de temperatura o potencia radiante, han servido como puntos de comparación. La segunda fase de la validación se llevó a cabo al trazar una curva I-V simulada a partir de los parámetros calculados en el proceso de extracción y calcular nuevamente los parámetros de desempeño de esta curva.

Con el objetivo de facilitar tanto la entrada de datos como la visualización de los resultados, y para implementar el análisis de imágenes, se han desarrollado dos herramientas de software mediante el uso de MATLAB. Estas herramientas permiten la identificación de las regiones de interés en la imagen de la curva proporcionada por el fabricante o la curva experimental.

Con el fin de localizar de manera precisa la región donde la resistencia serie (R_s) tiene mayor presencia, y considerando un proceso de fabricación desarrollado en los laboratorios de INAOE, se llevó a cabo un estudio de celdas solares de estructura simple. Este estudio tuvo como finalidad obtener la resistencia superficial de manera teórica a través de un circuito equivalente que modela las diferentes componentes de la resistencia.

Durante la etapa de validación de la metodología, utilizando celdas fabricadas en el INAOE, se implementó un sistema de control de temperatura para obtener los parámetros de desempeño y la curva I-V experimental, en condiciones estándar de prueba (STC). Los resultados obtenidos fueron comparados con otros métodos previamente reportados en la literatura, mostrando aproximaciones aceptables tanto para representar la curva simulada de celdas individuales como para paneles solares. La metodología propuesta en este trabajo de tesis, dadas sus características, podría

considerarse como una metodología gráfica (Figura 5.38). Esta metodología puede servir como base para futuros enfoques fundamentados en la propuesta realizada en este trabajo.

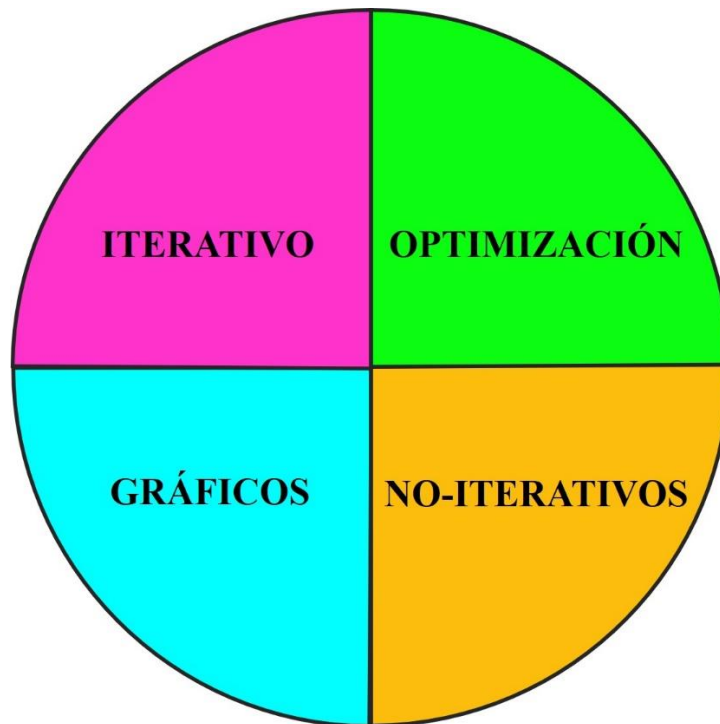


Figura 5.38. Métodos utilizados para la extracción y modelado de dispositivos solares, considerando la metodología propuesta en este trabajo de tesis puede considerarse como un método gráfico.

Capítulo 6.

En este trabajo de tesis se desarrolló un método basado en el modelo de un diodo SDM para extraer los parámetros que representan las pérdidas en dispositivos fotovoltaicos, como celdas y paneles solares, permitiendo así analizar ambos tipos de dispositivos.

Se propone un método para calcular u obtener directamente los valores de R_s y R_p mediante el cálculo de la pendiente en las ramas de I_{sc} y V_{oc} de la curva I-V experimental o proporcionada por el fabricante en las zonas de interés.

Este método desarrollado, al no ser iterativo, brinda la flexibilidad de seleccionar el paso de aproximación para realizar los cálculos y posicionarse de manera precisa en el punto de máxima potencia, crucial para determinar la eficiencia del dispositivo fotovoltaico.

Además, el método permite modificar y analizar directamente las condiciones de potencia radiante (G) y temperatura (T) a las que se encuentra expuesto el dispositivo solar, desde condiciones estándar (STC) hasta condiciones extremas.

Como solución a la problemática de la disponibilidad de bases de datos o curvas experimentales, el método también posibilita el análisis de imágenes previamente procesadas de curvas I-V proporcionadas por el fabricante en la hoja de datos, lo que abre nuevas posibilidades para el desarrollo de metodologías basadas en métodos gráficos o análisis de imágenes.

Se diseñaron y programaron herramientas de software para hacer que la implementación del método sea más accesible, tanto para llevar a cabo la extracción de parámetros como para obtener una curva simulada, que sirve como una comprobación de la extracción de parámetros. Esta curva simulada permite recalcular los parámetros de desempeño y realizar una comparación directa con los valores

proporcionados por el fabricante en la hoja de datos o aquellos obtenidos experimentalmente mediante la caracterización con un emulador solar.

Gracias al proceso de fabricación de celdas solares en INAOE, se pudo analizar celdas solares de estructura simple, lo que permitió delimitar la zona donde la resistencia en serie (R_s) tiene mayor impacto y aproximarse a dicha zona con el método propuesto para calcular dicho parámetro.

El análisis de las celdas solares de estructura simple también permitió determinar cómo la profundidad de unión (x_j) en la formación del emisor afecta directamente a R_s y, por lo tanto, a la eficiencia y otros parámetros de desempeño del dispositivo solar.

Como validación del método desarrollado en este trabajo de tesis, se realizó una comparación con otros métodos reportados en la literatura, lo que demostró que el método propuesto tiene una buena aproximación para analizar tanto celdas solares individuales como paneles solares comerciales, así como celdas fabricadas en INAOE y paneles comerciales de nueva generación.

Trabajo a futuro

De acuerdo a los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo de tesis doctoral se propone continuar con algunos estudios tal como:

- Optimización de la rejilla superior y contacto posterior, con el fin de disminuir la resistencia en serie.
- Fabricación de celdas solares de estructura simple, en substratos con espesor menor a 300 μm y resistividad menor a 10 $\Omega\text{-cm}$.
- Determinación de la resistencia de hoja (R_{SH}), tanto para el substrato como para el emisor, en cada etapa del proceso de fabricación, con el fin de determinar como esta se modifica en cada una de las etapas.

Con el fin de mejorar las mediciones y caracterización eléctrica, se propone la implementación de un sistema de control de temperatura, basado en la circulación de agua que complemente el simulador solar.

La herramienta de software necesita ser refinada para lograr un funcionamiento óptimo por lo que se propone:

- Optimización del algoritmo de programación, para aplicaciones en el seguimiento del máximo punto de potencia.
- Mejora de la herramienta programación para la extracción de parámetros por medio del análisis de imágenes para la obtención de una patente.

Referencias.

- [1] BP, “Statistical Review of World Energy 2022”, 2022, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- [2] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), “Maintaining a Clear Intention to Keep 1.5°C Within Reach”, <https://unfccc.int/maintaining-a-clear-intention-to-keep15degc-within-reach>, accessed June 28, 2023.
- [3] World Meteorological Organization, “Climate and Weather Extremes in 2022 Show Need for More Action”, December 23, 2022, <https://public.wmo.int/en/media/news/climate-and-weather-extremes-2022-show-need-more-action>
- [4] United Nations Environment Programme (UNEP), “COP27 Ends with Announcement of Historic Loss and Damage Fund”, November 22, 2022, <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop27-ends-announcement-historic-loss-and-damage-fund>
- [5] FleishmanHillard, “National Hydrogen Strategies in the EU Member States”, February 2022, <https://fleishmanhillard.eu/wpcontent/uploads/sites/7/2022/02/FH-National-HydrogenStrategies-Report-2022.pdf>.
- [6] Deloitte, “2023 Renewable Energy Industry Outlook”, 2023, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/us-eri-renewable-energyoutlook-2023.pdf>.
- [7] IEA, “Energy Technology Perspectives 2023”, 2023, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>

- [8] Ballif, Christophe & Haug, Franz-Josef & Boccard, Mathieu & Verlinden, Pierre & Hahn, Giso. (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*. 7. 10.1038/s41578-022-00423-2.
- [9] José de Jesús Martínez Basilio, “Desarrollo e Investigación de un Proceso de Fabricación de Celdas Solares Basadas en la Tecnología del c-Si, INAOE”, Tesis de Doctorado, (2017).
- [10] Green, M.A. (2001), Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 9: 123-135. <https://doi.org/10.1002/pip.360>
- [11] Schmid, M., Revisiting the Definition of Solar Cell Generations. *Adv. Optical Mater.* 2023, 11, 2300697. <https://doi.org/10.1002/adom.202300697>
- [12] William Shockley, Hans J. Queisser; Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *J. Appl. Phys.* 1 March 1961; 32 (3): 510–519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>
- [13] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [14] Green, MA, Dunlop, ED, Hohl-Ebinger, J, et al. Solar cell efficiency tables (Version 60). *Prog Photovolt Res Appl.* 2022; 30(7): 687-701. doi:10.1002/pip.3595
- [15] J. Xu, C. Boyd, Z. Yu, A. Palmstrom, D. Witter, B. Larson, R. France, J. Werner, S. Harvey, E. Wolf, W. Weigand, S. Manzoor, M. F. A. M. Hest, J. Berry, J. Luther, Z. Holman, M. McGehee, *Science* 2020, 367, 1097. <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.aaz5074?src=getftr>
- [16] M. Heinrich, T. E. Kuhn, F. Dimroth, U. Würfel, J. C. Goldschmidt, M. Powalla, S. Glunz, D. H. Neuhaus, in *Proc. 37th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition*, Lisbon, September 2020.
- [17] <https://www.iea.org/>
- [18] Altermatt, P. P. et al. in *Proceedings of the 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC, 2020)*.
- [19] A. Rezaee Jordehi, 2016, Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 61, Pages 354-371, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.049>.
- [20] Allam D, Yousri DA, Eteiba MB (2016) Parameters extraction of the three-diode model for the multi-crystalline solar cell/module using Moth-Flame Optimization Algorithm. *Energy Convers Manage* 123:535–548

- [21] Orioli A, Di Gangi A. A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data. *Appl Energy*. 2013;102:1160-1177.
- [22] McEvoy, A., Markvart, T., Castaner, L., Markvart, T., & Castaner, L. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier, 2003.
- [23] Villalva, M.; Gazoli, J.; Filho, E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Trans. Power Electron*. 2009, 24, 1198–1208.
- [24] Shur Michael, *Introduction to Electronic Devices*, University of Virginia, Jhon Wiley & Sons, 1996.
- [25] Schröder Dieter K. *SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION*, Arizona State University, Jhon Wiley & Sons, 2006.
- [26] A Goetzberger, J Knobloch and B Voss. *Crystalline silicon solar cells*. John Wiley & Sons Ltd, 1 edition, 1998.
- [27] Giovanni Petrone, Carlos Andres Ramos-Paja, Giovanni Spagnuolo, *Photovoltaic Sources Modeling*, Jhon Wiley & Sons, 2017, pages 1-19, <https://doi.org/10.1002/9781118755877.ch1>
- [28] A. A. K. Ismaeel, E. H. Houssein, D. Oliva and M. Said, "Gradient-Based Optimizer for Parameter Extraction in Photovoltaic Models," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 13403-13416, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052153.
- [29] Sarkar, Md. Nazmul Islam. (2016). Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis. *Renewables: Wind, Water, and Solar*. 3. 1-9. 10.1186/s40807-016-0035-3.
- [30] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* (2nd ed.). London: Wiley.
- [31] Ahmad, Tanvir & Sobhan, Sharmin & Nayan, Faysal. (2016). Comparative Analysis between Single Diode and Double Diode Model of PV Cell: Concentrate Different Parameters Effect on Its Efficiency. *Journal of Power and Energy Engineering*. 04. 31-46. 10.4236/jpee.2016.43004.
- [32] Gow, J. and Manning, C. (1999) Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, 146 (2), 193–200, doi:10.1049/ip-epa:19990116.
- [33] Khanna, V., Das, B., Bisht, D., Vandana, and Singh, P. (2015) A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using {PSO} algorithm. *Renewable Energy*, 78, 105–113,

- doi:10.1016/j.renene.2014.12.072.
 URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115000063>.
- [34] Nishioka, K., Sakitani, N., Uraoka, Y., & Fuyuki, T. (2007). Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(13), 1222–1227. doi:10.1016/j.solmat.2007.04.009.
- [35] Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2014a). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 304-315.
- [36] Ukoima, Kelvin & Agwu, Ekwe. (2019). THREE-DIODE MODEL AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC (PV) CELLS. 5. 108-116. 10.33922/j.ujet_v5i1_12.
- [37] Venkateswari, Radhakrishnan & Rajasekar, Natarajan. (2021). Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 31. 10.1002/2050-7038.13113.
- [38] Batzelis, Efstratios. (2019). Non-Iterative Methods for the Extraction of the Single-Diode Model Parameters of Photovoltaic Modules: A Review and Comparative Assessment. *Energies*. 12. 10.3390/en12030358.
- [39] Kumar M, Kumar A. An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment. *Solar Energy*. 2017;158:192-206
- [40] Senturk, A.; Eke, R. A new method to simulate photovoltaic performance of crystalline silicon photovoltaic modules based on datasheet values. *Renew. Energy* 2017, 103, 58–69.
- [41] Weidong X, Dunford WG, Capel A. A novel modeling method for photovoltaic cells. In: 35th Annual power electronics specialists conference, 2004, PESC 042004, vol. 3. IEEE; 2004. p. 1950–6.
- [42] Ciulla G, Lo Brano V, Di Dio V, Cipriani G. A comparison of different one-diode models for the representation of I–V characteristic of a PV cell. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;32:684– 96.
- [43] Ishaque K, Salam Z. An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE). *Solar Energy* 2011;85:2349–59.
- [44] Ghani F, Rosengarten G, Duke M, Carson JK. On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. *Solar Energy* 2015;112:437–45.

- [45] Gandomi, Amir & Yang, Xin-She & Talatahari, Siamak & Alavi, Amir. (2013). Metaheuristic Algorithms in Modeling and Optimization. 10.1016/B978-0-12-398364-0.00001-2.
- [46] Almufti, Saman & Shaban, Awaz & Ali, Rasan & Fuente, Jayson. (2023). Overview of Metaheuristic Algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*. 2. 10-32. 10.58429/pgjsrt.v2n2a144.
- [47] Sachin Desale, Akhtar Rasool, Sushil Andhale, Priti Rane, HEURISTIC AND META-HEURISTIC ALGORITHMS AND THEIR RELEVANCE TO THE REAL WORLD: A SURVEY, *International journal of computer engineering in research trends* volume 2, issue 5, may 2015, PP 296-304.
- [48] Senturk, A.; Eke, R. A new method to simulate photovoltaic performance of crystalline silicon photovoltaic modules based on datasheet values. *Renew. Energy* 2017, 103, 58–69.
- [49] Louzazni, M.; Aroudam, E.H. An analytical mathematical modeling to extract the parameters of solar cell from implicit equation to explicit form. *Appl. Sol. Energy* 2015, 51, 165–171.
- [50] Phang, J.C.H.; Chan, D.S.H.; Phillips, J.R. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. *Electron. Lett.* 1984, 20, 406–408.
- [51] Accarino, J.; Petrone, G.; Ramos-Paja, C.A.; Spagnuolo, G. Symbolic algebra for the calculation of the series and parallel resistances in PV module model. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Alghero, Italy, 11–13 June 2013; pp. 62–66.
- [52] Cubas, J.; Pindado, S.; Victoria, M. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior. *J. Power Sources* 2014, 247, 467–474.
- [53] Sera, D.; Teodorescu, R.; Rodriguez, P. Photovoltaic module diagnostics by series resistance monitoring and temperature and rated power estimation. In *Proceedings of the 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA, 10–13 November 2008; pp. 2195–2199.
- [54] Khan, F.; Baek, S.H.; Park, Y.; Kim, J.H. Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions. *Energy Convers. Manag.* 2013, 76, 421–429.
- [55] Cannizzaro, S.; Di Piazza, M.C.; Luna, M.; Vitale, G. PVID: An interactive Matlab application for parameter identification of complete and simplified single-diode PV models. In *Proceedings of the 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Santander, Spain, 22–25 June 2014.

- [56] Robin J. Wilson, INTRODUCTION TO GRAPH THEORY, fourth edition, Prentice Hall, 1996.
- [57] Mendoza, Fernando & Lu, Renfu. (2015). Basics of Image Analysis. 10.1007/978-1-4939-2836-1_2.
- [58] Prats-Montalbán JM, de Juan A, Ferrer A (2011) Multivariate image analysis: a review with applications. Chemometr Intell Lab 107:1–23
- [59] Aguilera JM, Stanley DW (1999) Microstructural principles of food processing and engineering, 2nd edn. Aspen, Gaithersburg.
- [60] Darko Stipaničev, Introduction to Digital Image Processing and Analysis, UNIVERSITY OF SPLIT, Croatia, 1994.
- [61] Israel Vivaldo De la Cruz. Fabricación y Optimización de Celdas Solares de Silicio con SRO Nanoestructurado. PhD thesis, Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2013.
- [62] Oscar J Velandia Caballero, Estudio y desarrollo de celdas solares basadas en estructuras de silicio cristalino / silicio amorfo dopado, INAOE, Tesis de maestría, Puebla, México, 2018.
- [63] Manuel J Heredia Rios, “Estudio del comportamiento y degradación de celdas solares para aplicaciones espaciales”, INAOE, Tesis de maestría, Puebla, México, 2019.
- [64] T. Mambrini, A. M. Dubois, C. Longeaud, J. Badosa, M. Hae_elin, L. Prieur, and V.Radivoniuk. Photovoltaic yield: correction method for the mismatch between the solar spectrum and the reference astm am1.5g spectrum. EPJ Photovoltaics, 6, pp :1-8, 2015.
- [65] A. Luque and S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons, 2002.
- [66] <http://www.technosun.com/es/productos/analizador-solar-paneles-solares-sistemas-TECHNO-SUN-SYSLAB.php>
- [67] Hashim, U. & Adam, Tijjani & Hamat, N.H. & Fatimah, Siti. (2012). Shallow Junction Formation: A Simulation Based Study of Thermal Diffusion by Spin- on-dopants technique. Journal of Applied Sciences Research. 8.
- [68] M. A. Green, High-efficiency silicon solar cell concepts McEvoy's Handbook of Photovoltaics, pp. 95, 2018, Elsevier.
- [69] K. Suzuki, H. Tashiro, Y. Tada and Y. Kataoka. *Anomalous phosphorous diffusion*. IEEE Transactions on Electron Devices, 49(11), pp: 2031-2035, 2002.

- [70] Fahey, Paul & Griffin, P. & Plummer, Jim. (1989). Point Defects and Dopant Diffusion in Silicon. *Reviews of Modern Physics*. 61. 289-384. 10.1103/RevModPhys.61.289.
- [71] Peter B. Griffin, James D. Plummer and Michael Deal. *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling*. Prentice Hall, 2000.
- [72] James D. Plumer, Michael D. Deal, Peter B. Griffin, *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling*, Prentice Hall Electronics and VLSI series- Charles Sodini, 2000.
- [73] K. Misiakos y Tsamakis, D., «Accurate measurements of the silicon intrinsic carrier density from 78 to 340 K», *Journal of Applied Physics*, vol. 74, n.º 5, p. 3293, 1993.
- [74] Green, M.A. (1981). *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*.
- [75] Saikrishna, G., Parida, S. K., & Behera, R. K. (2015). *Effect of parasitic resistance in solar photovoltaic panel under partial shaded condition*. 2015 International Conference on Energy Systems and Applications. doi:10.1109/icesa.2015.7503378
- [76] Van Dyk, E. E., & Meyer, E. L. (2004). Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 29(3), 333–344. doi:10.1016/s0960-1481(03)00250-7
- [77] Eitel Leopoldo Peltzer y Blanca; *INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA DE SEMICONDUCTORES Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS*; Universidad Nacional de la Plata; edulp, Buenos airea argentina, primera edición, 2021.
- [78] Venkateswari, Radhakrishnan & Rajasekar, Natarajan. (2021). Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 31. 10.1002/2050-7038.13113.
- [79] Leonardo Sandrolini, Marcello Artioli, Ugo Reggiani Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analisis *Applied Energy*, 87 (2) (2010), pp. 442-451
- [80] W. De Soto, S.A.Klein, andW. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Jan. 2006.
- [81] Q. Kou, S. A. Klein, and W. A. Beckman, “A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems,” *Solar Energy*, vol. 64, no. 1–3, pp. 33–40, Sep. 1998.

- [82] J. Crispim, M. Carreira, and R. Castro, "Validation of photovoltaic electrical models against manufacturers data and experimental results," in Proc. Int. Conf. Power Eng., Energy Elect. Drives, POWERENG, 2007, pp. 556–561.
- [83] Sarkar, Md. Nazmul Islam. (2016). Effect of various model parameters on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis. Renewables: Wind, Water, and Solar. 3. 1-9. 10.1186/s40807-016-0035-3.
- [84] "KC200GT High Efficiency Multicrystalline Photovoltaic Module Datasheet Kyocera," [Online]. Available: <http://www.kyocera.com>.
- [85] Josean Ramos-Hernanz, Jose Manuel Lopez-Guede, Ekaitz Zulueta, Unai Fernandez-Gamiz, "Reverse Saturation Current Analysis in Photovoltaic Cell Models", WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, pp 231-237, Volume 12, 2017.
- [86] G.El-Saady, El-NobiA.Ibrahim, Mohamed EL-Hendawi, Simulated Annealing Modeling and Analog MPPT Simulation for Standalone Photovoltaic Arrays, January 2013.
- [87] <https://docplayer.net/17995165-Chapter-2-application-of-matlab-simulink-in-solar-pv-systems.html.90>
- [88] Darko Stipaničev, Introduction to Digital Image Processing and Analysis, UNIVERSITY OF SPLIT, Croatia, 1994
- [89] Md Jan, Mardhiyah & Zainal, Nasharuddin & Jamaludin, Shahrizan. (2020). Region of interest-based image retrieval techniques: a review. 9. 520. 10.11591/ijai.v9.i3.pp520-528
- [90] Easwarakhanthan, T.; Bottin, J.; Bouhouch, I.; Boutrit, C. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers. Int. J. Sol. Energy 1986, 4, 1–12.
- [91] <http://m.sunpropowersky.com/solar-panel/mono-solar-panel/450w-144cells-mono-solar-panel-with-black.html>
- [92] Mártil, Ignacio & González-Díaz, G. (2000). Determination of the dark and illuminated characteristic parameters of a solar cell from I-V characteristics. European Journal of Physics. 13. 193. 10.1088/0143-0807/13/4/009.
- [93] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/iv-measurements>
- [94] Niasse, O. , Tankari, M. , Dia, F. , Mbengue, N. , Diao, A. , Niane, M. , Diagne, M. , Ba, B. and Levebvre, G. (2016) Optimization of Electric Parameters CdS/CdTe Thin Film Solar Cell Using Dielectric Model. World Journal of Condensed Matter Physics, 6, 75-86. doi: 10.4236/wjcmp.2016.62011.

- [95] Ma, Xuan & Huang, Wei-Heng & Schnabel, Erdmut & Köhl, Michael & Brynjarsdóttir, Jenný & Braid, Jennifer & French, Roger. (2019). Data-Driven I-V Feature Extraction for Photovoltaic Modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*. PP. 1-8. 10.1109/JPHOTOV.2019.2928477.
- [96] Hashim, M. Bajuri, S. Niza, B. Yeop Majlis, N. Hamidah and A. Halim. Shallow junction determination and boron profiling using electrochemical capacitance voltage (ecv). *Jurnal Fizik Malaysia*, 31(4), pp:37-42, 2010.
- [97] Ye M.; Wang, X.; Xu, Y. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization. *J. Appl. Phys.* 2009, 105, 1–8.
- [98] Laudani, A., Riganti Fulginei, F., & Salvini, A. (2014). High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms. *Solar Energy*, 103, 316–326. doi:10.1016/j.solener.2014.02.014
- [99] Cubas, Javier & Pindado, Santiago & Sorribes, Felix. (2017). Analytical Calculation of Photovoltaic Systems Maximum Power Point (MPP) Based on the Operation Point. *Applied Sciences*. 7. 870. 10.3390/app7090870.
- [100] Ben aribia, Housseem & El-Rifaie, Ali & Tolba, Mohamed & Shaheen, Abdullah & Moustaffa, Ghareeb & Elsayed, Fahmi & Elshahed, Mostafa. (2023). Growth Optimizer for Parameter Identification of Solar Photovoltaic Cells and Modules. *Sustainability*. 15. 7896. 10.3390/su15107896.
- [101] N. Echeverría, M.P. Cervellini, R. García Retegui, S.A. González, M. Funes y D. Carrica, Extracción de parámetros de un panel solar utilizando algoritmos genéticos, (2014).
- [102] Mathew, Derick & Rani, Christia & Farrag, Mohamed & Wang, Yue & Busawon, Krishna & Muthu, Rajesh. (2017). An improved optimization technique for estimation of solar photovoltaic parameters.
- [103] Elazab, O.S.; Hasanien, H.M.; Elgendy, M.A.; Abdeen, A.M. Parameters estimation of single-and multiple-diode photovoltaicmodel using whale optimisation algorithm. *IET Renew. Power Gener.* 2018, 12, 1755–1761.