



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

CARACTERIZACIÓN DE PANELES SOLARES: ELECTROLUMINISCENCIA Y EFICIENCIA DE CONVERSIÓN

T E S I S

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

Alondra Itzamara García Rodríguez

Asesores:

Dr. Alfonso Lastras Martínez

Dr. Oscar Fernando Núñez Olvera

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2023





15 de junio de 2023

**ING. ALONDRA ITZAMARA GARCÍA RODRÍGUEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Alfonso Lastras Martínez y Oscar Fernando Núñez Olvera**, Asesor y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ingeniería Eléctrica**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 15 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Caracterización de paneles solares: Electroluminiscencia y eficiencia de conversión"

1. Introducción.
2. Física y tecnología de celdas fotovoltaicas de silicio.
3. Arreglos experimentales para la caracterización eléctrica y óptica de paneles fotovoltaicos de silicio.
4. Resultados experimentales: Caracterización eléctrica y electroluminiscente de paneles solares de silicio.
5. Estudio comparativo de la eficiencia de conversión de paneles fotovoltaicos comerciales.
6. Conclusiones.
Apéndices.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**



www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"UASLP, más de un siglo educando con autonomía"

Para mi familia...

Si nadie me lo pregunta, lo sé; pero si quiero explicárselo al que me lo pregunta, no lo sé.

- San Agustín de Hipona

Agradecimientos

Para mi papá, mamá y hermano, que creyeron y me apoyaron desde el primer momento que decidí hacer una maestría, aunque sería fuera de la ciudad. Por todo su apoyo y amor desde que me mudé, cuando estaba en la etapa de estrés y hasta el termino de mi maestría, por nunca dejarme sola y estar siempre ahí para mí cuando más lo necesitaba, por todas esas veces que me quise dar por vencida y ellos luchaban para que llegara hasta este punto de mi vida, por esas veces que les hablaba por teléfono y quería llorar porque no podía ir a verlos debido a compromisos y todas esas veces que soportaron mis momentos de enojo.

Al doctor Alfonso Lastras Martínez que me ofreció el tema de tesis y me apoyó en todas las dudas que con el tiempo iban surgiendo, a sus clases y su área de estudio que sin ellas no podría haber logrado terminar con éxito mi maestría.

Al doctor Oscar Fernando Núñez Olvera que desde el comienzo de este trabajo estuvo ayudándome cada día con sus conocimientos a poner en marcha la estación de evaluación de paneles solares, también agradecerle el tiempo grato que se tuvo los días de mucho trabajo y los días de estrés y pláticas que teníamos.

A Lorena, Niño, Gustavo y a todas las demás personas que me acompañaron en este proceso a lo largo de estos 2 años de maestría, gracias a las personas que me apoyaban cada que me atoraba con algo en algún otro proceso, a las personas que me escucharon cada vez que solía tener estrés o felicidad en cada logro cometido, a las personas que se quedaban conmigo desde todo el día hasta anochecer.

Y a Rubén que siempre estuvo ahí para mí, por soportarme por cada vez que tenía estrés, tristeza o alguna otra emoción, por ayudarme a sobrellevar el mal rato y darme una mano cada día, por todo el cariño y apoyo demostrado a lo largo de este año de la realización de la tesis, por la emoción y entusiasmo el día que presenté mi examen previo y por todos los pequeños logros que celebraba conmigo.

Resumen:

El auge de la energía solar, específicamente en la fabricación de paneles solares, ha hecho que se fabriquen paneles solares en mayor magnitud afectando la eficiencia con la que se están entregando al sector doméstico, público o privado, debido a esto, el siguiente trabajo consiste en el estudio de la caracterización de diez paneles solares de silicio mediante el análisis de las tomas de imágenes de electroluminiscencia (EL) correlacionando los resultados con la eficiencia de conversión de las curvas características I-V que se han obtenido en la estación de pruebas de paneles solares del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO). La combinación del método del procesamiento de imágenes de electroluminiscencia y las curvas características I-V nos permite evaluar detalladamente la calidad de los paneles solares y su eficiencia, por lo tanto, la electroluminiscencia nos permite escanear internamente fallos en la estructura de las celdas o paneles solares, mientras que las curvas I-V nos brindan un estudio cuantitativo de cómo los fallos afectan al rendimiento eléctrico del panel solar.

Como resultado de este trabajo, se presenta un análisis detallado para validar el método de las tomas de electroluminiscencia con un análisis de procesamiento de imágenes en combinación con las curvas características I-V, siendo un método adecuado para determinar su rendimiento y calidad.

Palabras claves: Panel solar, panel solar monocristalino, panel solar policristalino, electroluminiscencia, característica eléctrica, curvas características I-V, intensidad electroluminiscente, coeficiente de variación, eficiencia, homogeneidad, heterogeneidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
1. Introducción	1
1.1 Objetivo de la tesis	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Aportación de la tesis	2
2. Física y tecnología de celdas fotovoltaicas de silicio	3
2.1 Celda solar.....	3
2.2 Características eléctricas de celdas fotovoltaicas de silicio	7
2.3 Electroluminiscencia de paneles solares de silicio.....	10
2.3.1 Defectos en los paneles solares mediante electroluminiscencia	13
3. Arreglos experimentales para la caracterización eléctrica y óptica de paneles fotovoltaicos de silicio	15
3.1 Toma de imágenes de electroluminiscencia.....	15
3.2 Estación de pruebas de paneles solares	17
3.3 Modelado matemático de las curvas características I-V mediante el método de Newton-Raphson.....	19
3.4 Parámetros para el análisis de las imágenes de electroluminiscencia	21
4. Resultados experimentales: Caracterización eléctrica y electroluminiscente de paneles solares de silicio	23
5. Estudio comparativo de la eficiencia de conversión de paneles fotovoltaicos comerciales	46
6. Conclusiones	51
Apéndice A Calibración del piranómetro CMP 3	53
Apéndice B Código del modelado matemático para las curvas I-V	57
Referencias.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Un esquema de una celda solar convencional. Creación de pares electrón-hueco, e^- y h^+ , respectivamente. [1].....	3
Figura 2.2. Absorción de luz en una unión P-N. [2]	4
Figura 2.3. Colección de portadores en una unión P-N. [2]	4
Figura 2.4. Fotocorriente generada en una celda solar. [2].....	4
Figura 2.5. (a) Celda solar monocristalina. (b) Celda solar policristalina.	5
Figura 2.6. Estructura de un panel solar. [3].....	6
Figura 2.7. Eficiencia de las celdas solares. [4].....	7
Figura 2.8. Modelo eléctrico de una celda solar ideal.	7
Figura 2.9. Modelo eléctrico de una celda solar con efectos resistivos.	8
Figura 2.10. Curva característica I-V de una celda solar. [5]	9
Figura 2.11. Efectos de la resistencia (a) paralelo y (b) serie sobre las características I-V de una celda solar. [2].....	10
Figura 2.12. Estructuras de bandas de un semiconductor y transiciones interbandas en (a) un semiconductor con ancho de bandas directa y (b) indirecta. [2].....	11
Figura 2.13. Recombinación radiativa y no radiativa. [2]	12
Figura 2.14. Defectos encontrados en un panel solar policristalino de Canadian Solar. Grietas (flechas rojas), huellas de caracol (rectángulo verde), roturas (círculos blancos), dedos rotos (rectángulo amarillo) y la heterogeneidad cristalina (círculos morados). [6]	14
Figura 3.1. Esquema para la toma de electroluminiscencia de los paneles solares.	15
Figura 3.2. (a) Retiro del espejo caliente de bloqueo de infrarrojos. (b) Instalación del nuevo filtro de infrarrojos R72 para la conversión de la cámara. [7]	16
Figura 3.3. Estación de pruebas de paneles solares instalado en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica.....	17
Figura 3.4. Circuito generador de curva característica IV. [8]	18
Figura 3.5. Rediseño del panel de control del programa de la estación de pruebas de paneles solares.....	19
Figura 4.1. Numeración de las celdas de los paneles solares policristalinos.	25
Figura 4.2. Numeración de las celdas de los paneles solares monocristalinos.	25

Figura 4.3. Imágenes ópticas de los paneles analizados.	26
Figura 4.4. Curvas características I-V de los diez paneles solares con los distintos parámetros que determinan el rendimiento del panel solar.	31
Figura 4.5. Imágenes de electroluminiscencia de los paneles solares analizados.	35
Figura 4.6. Análisis de la intensidad electroluminiscente de los paneles solares analizados.	39
Figura 4.7. Análisis de la intensidad electroluminiscente del panel Solarnorte 2 sin considerar la fila de celdas con mayor intensidad.	40
Figura 4.8. Análisis del coeficiente de variación del panel Solarnorte 2 sin considerar la fila de celdas con mayor intensidad electroluminiscente.	42
Figura 4.9. Análisis de la homogeneidad con el coeficiente de variación ΔII de los distintos paneles solares.	45
Figura 5.1. Costo del watt ajustado de cada panel solar en comparación con el costo real que cuesta cada watt generado este análisis.	49
Figura 5.2. Correlación de la eficiencia de los paneles solares con referencia a ΔII	50
Figura A.1. Piranómetros nivelados para la toma de muestras.	54
Figura A.2. Curva de radiación solar de los piranómetros CMP 3 y CMP 11 sin calibración.	55
Figura A.3. Curva de radiación solar del piranómetro CMP 3 calibrada respecto al piranómetro CMP 11.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros eléctricos y fotográficos fundamentales utilizados para la adquisición de imágenes de electroluminiscencia	16
Tabla 4.1. Asignación del identificador para cada uno de los diez paneles solares medidos.	23
Tabla 4.2. Características eléctricas proporcionadas por los fabricantes de las cuatro marcas de paneles solares a analizar.	24
Tabla 4.3. Características eléctricas reales de los paneles solares.	29
Tabla 5.1. Costo y fecha de compra de los paneles solares comerciales analizados.	47
Tabla 5.2. Costo del watt en cada año de compra según la Agencia Internacional de Energía (IEA). [9]	47
Tabla 5.3. Costo por watt de cada panel solar ajustado al 2019 por los datos de IEA.	48
Tabla A.1. Especificaciones y características del piranómetro CMP 3.	53
Tabla A.2. Especificaciones y características del piranómetro CMP 11.	53
Tabla A.3. Valores obtenidos de los piranómetros CMP3 y CMP 11 con su respectiva radiación solar y calibración.	56

Capítulo 1

Introducción

La energía solar, derivada del sol, ha emergido como una valiosa fuente de energía renovable y se ha convertido en uno de los métodos más prometedores para la producción de electricidad. A lo largo de la historia, los seres humanos han empleado la energía solar en diversas aplicaciones, desde el aprovechamiento de la luz solar para iluminación hasta la utilización de la energía térmica solar para calentar agua. En la actualidad, los avances tecnológicos en la energía fotovoltaica la han vuelto más eficiente y accesible. Los paneles solares fotovoltaicos, conformados por células solares que contienen materiales semiconductores, tienen la capacidad de generar electricidad al ser expuestos a la luz solar y se han convertido en la opción más popular para capturar y convertir la energía solar en electricidad.

El constante avance en la creación de paneles solares fotovoltaicos ha sido impulsado por una serie de factores clave. Estos factores incluyen avances tecnológicos que buscan maximizar la eficiencia de conversión de energía solar en electricidad, así como una creciente conciencia ambiental que ha llevado a una mayor preocupación por combatir el cambio climático y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovable.

Además, la creciente demanda de paneles solares en todo el mundo ha tenido un impacto significativo en la industria, impulsando la producción a gran escala y reduciendo los costos de fabricación. Este fenómeno ha contribuido a que la energía solar sea más accesible para un número cada vez mayor de personas y empresas. La competencia en el mercado ha desempeñado un papel fundamental en este proceso, ya que ha llevado a la innovación continua y a mejoras en la calidad de los paneles solares.

A pesar de estos avances, todavía persiste la pregunta fundamental sobre la confiabilidad y eficiencia reales de los paneles solares de silicio comerciales. Es en este contexto que surge la necesidad de utilizar el método de electroluminiscencia y el análisis de las curvas características

I-V y P-V para evaluar de manera precisa la eficiencia de los paneles solares y determinar cuál de las cuatro marcas disponibles en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO) ofrece el mejor rendimiento y la máxima eficiencia eléctrica.

1.1 Objetivo de la tesis

Correlacionar la eficiencia de conversión del panel solar con las imágenes de electroluminiscencia para determinar la calidad del panel solar.

1.2 Objetivos específicos

a. Evaluar los paneles solares y determinar qué tan buena herramienta de evaluación es la electroluminiscencia para verificar la eficiencia de los paneles solares.

b. Tomar una foto de electroluminiscencia servirá de predictor para evaluar la calidad de un panel solar.

1.3 Aportación de la tesis

Esta tesis tiene como aportación hacer un estudio de la relación de la eficiencia de los paneles solares comerciales debido a su imagen de electroluminiscencia en relación con las curvas características I-V, esto no solo ayuda a evaluar la eficiencia de los paneles, sino que también contribuye a la ciencia al proporcionar métodos precisos para medir y mejorar la calidad de los dispositivos solares, avanzando así en la energía solar como fuente de energía renovable confiable y sostenible.

Capítulo 2

Física y tecnología de celdas fotovoltaicas de silicio

2.1 Celda solar

Las celdas fotovoltaicas son un método altamente eficiente para generar electricidad a partir de la luz solar. Las celdas fotovoltaicas o solares se fabrican con dos materiales semiconductores, uno tipo p y uno tipo n, que forman una unión P-N, como se observa en la Figura 2.1.

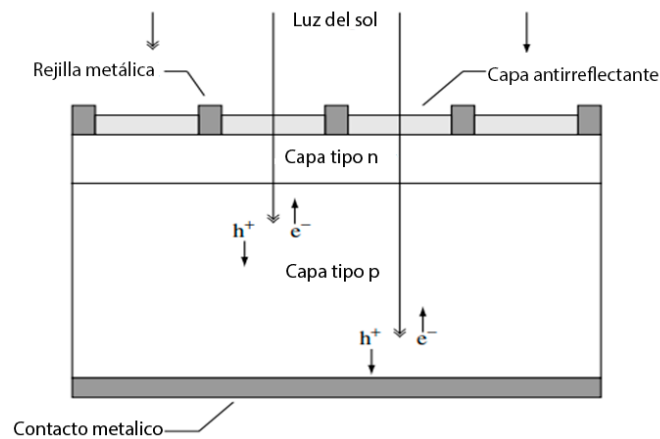


Figura 2.1. Un esquema de una celda solar convencional. Creación de pares electrón-hueco, e^- y h^+ , respectivamente. [1]

Cuando la luz solar incide sobre la superficie del panel solar, los fotones de luz son absorbidos por los electrones del material incrementando su energía. Posteriormente, la energía adquirida por los electrones puede convertirse en energía eléctrica en un circuito de carga externo. Este fenómeno se conoce como efecto fotovoltaico.

Como primer paso del efecto fotovoltaico, la absorción de la luz solar crea pares electrón-agujero (Figura 2.2). Una vez generados, los electrones y agujeros generados pueden recombinarse o bien pueden migrar hacia las fronteras de la unión p-n, los electrones hacia el lado n de la unión y los agujeros hacia el lado p (Figura 2.3). Si los pares electro-agujero generados se recombinan,

se pierde la energía absorbida. Por el contrario, los electrones y agujeros que logran llegar a las fronteras de la unión p-n pueden dar origen a una corriente en el circuito externo (Figura 2.4).

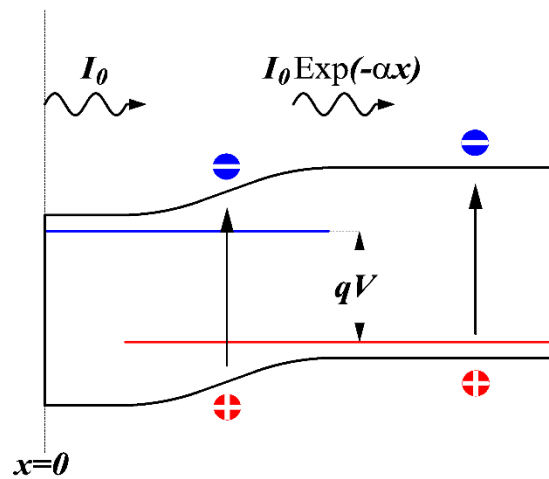


Figura 2.2. Absorción de luz en una unión P-N. [2]

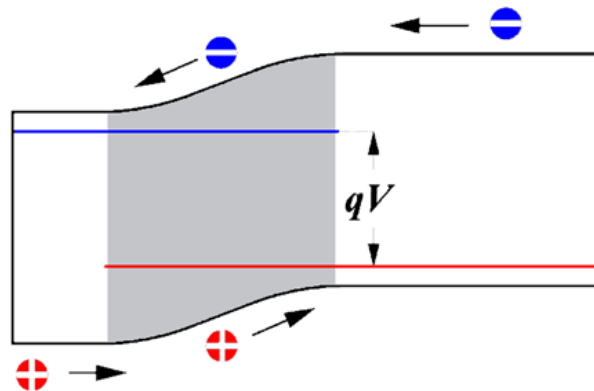


Figura 2.3. Colección de portadores en una unión P-N. [2]

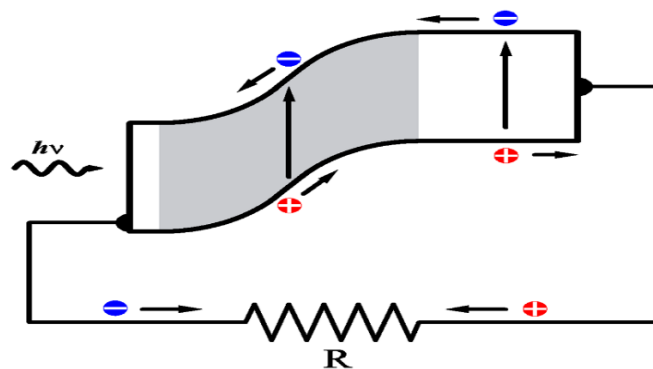


Figura 2.4. Fotocorriente generada en una celda solar. [2]

La tecnología fotovoltaica dominante está basada en el silicio en buena medida. En el mercado de la industria fotovoltaica existen diferentes tipos de celdas solares de silicio, cada una con características y tecnologías propias; a saber, celdas de silicio monocristalino, celdas de silicio policristalino y celdas de silicio amorfo.

Una celda solar monocristalina se fabrica fundiendo silicio de alta pureza con un dopante en una atmósfera inerte para formar un lingote policristalino. Posteriormente, el lingote se enfría lentamente para crear un cristal de silicio a partir de una semilla cristalina, el cual se corta en obleas delgadas de forma circular a partir de las cuales se fabrican las celdas solares. Las celdas monocristalinas se reconocen por un color azul uniforme, como se muestra en la Figura 2.5 (a).

En la fabricación de las celdas solares policristalinas se omite el proceso de cristalización, de modo que dichas celdas se caracterizan por tener múltiples cristales. Esto da a la superficie de las celdas policristalinas una apariencia heterogénea como se puede observar en la Figura 2.5 (b).

Dado que las celdas policristalinas no pasan por un proceso de cristalización, que requiere de altas temperaturas que consumen una gran cantidad de energía, su costo de fabricación es menor que el de las celdas cristalinas. Las celdas policristalinas, sin embargo, ofrecen una menor eficiencia de conversión. Por otro lado, las celdas policristalinas tienen una forma rectangular que hace un uso óptimo del área del panel, en contraposición con las celdas cristalinas que dejan pequeñas áreas del panel sin cubrir.

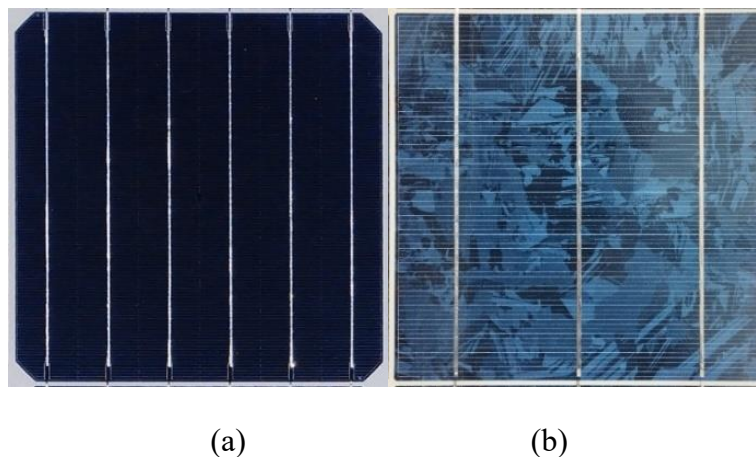


Figura 2.5. (a) Celda solar monocristalina. (b) Celda solar policristalina.

Los paneles solares fotovoltaicos están compuestos por celdas solares individuales, ya sean celdas solares monocristalinas o policristalinas, que están conectadas en serie o en paralelo para

aumentar la corriente o el voltaje, según las necesidades de la aplicación. Estos paneles se instalan típicamente en techos o estructuras expuestas al sol, o en campos o parques solares. Un panel solar debe de tener una estructura que lo proteja de las condiciones ambientales como se observa en la Figura 2.6 y una protección eléctrica que previene daños, incendios y cortocircuitos, entre otros riesgos.

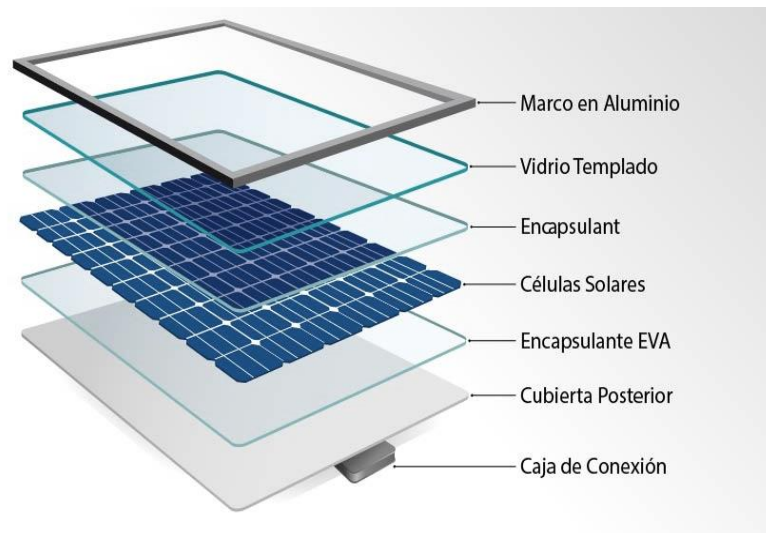


Figura 2.6. Estructura de un panel solar. [3]

Los fabricantes de paneles solares hacen pruebas de calidad bajo condiciones controladas. Las condiciones STC o Standar Test Conditions por sus siglas en inglés, son las condiciones base de temperatura, radiación solar y masa de aire con los cuales se evalúan los paneles solares y su desempeño. En condiciones STC la temperatura es de 25°C , la radiación solar es de $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ con un ángulo de incidencia de 45° , que determinan ciertas características eléctricas de funcionamiento del panel solar.

Además, la eficiencia de la celda solar depende del tipo de semiconductor con el que está fabricada. En la actualidad, esta eficiencia oscila entre el 15% y 20% dependiendo de si es silicio monocristalino o policristalino. Además, la eficiencia depende de las condiciones ambientales, incluyendo la distribución de la radiación solar entre luz directa y luz reflejada, y la temperatura ambiental. De manera adicional, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) señala que los paneles solares experimentan una degradación anual aproximada del 0.5%. Por lo tanto, a lo largo de su vida útil, un panel solar producirá alrededor del 90% de la electricidad que generaba en su primer año de vida, como se muestra en la Figura 2.7.

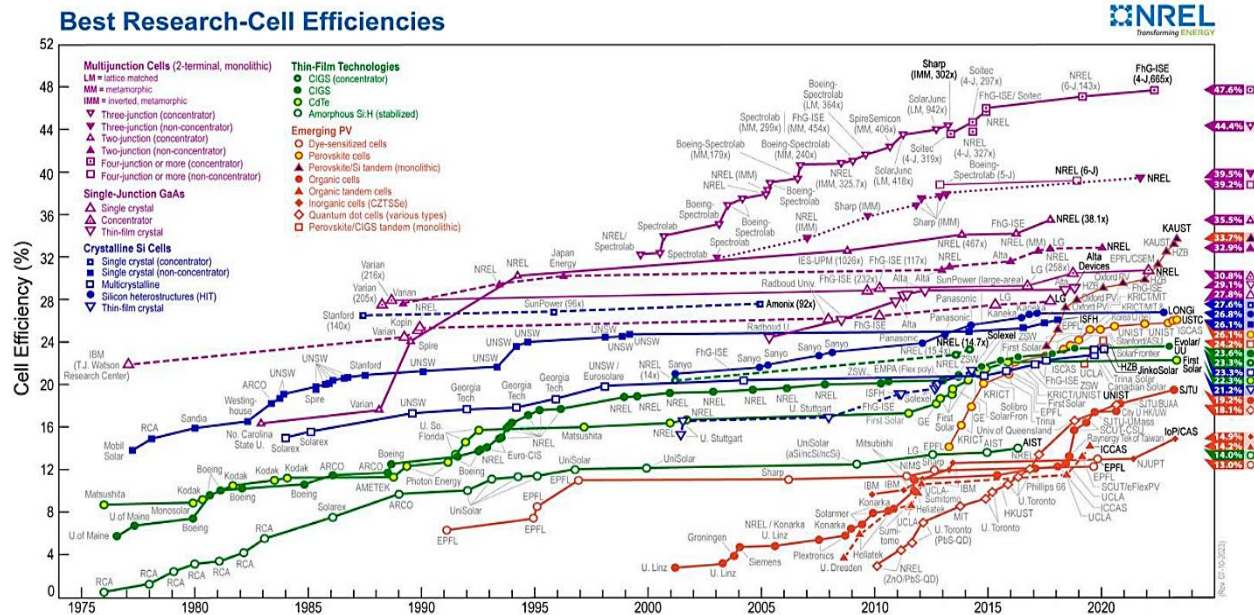


Figura 2.7. Eficiencia de las celdas solares. [4]

2.2 Características eléctricas de celdas fotovoltaicas de silicio

Una celda solar puede ser eléctricamente modelada como un diodo y una fuente de corriente en paralelo, como se muestra en la Figura 2.8. El modelo eléctrico de una celda solar se representa mediante la ecuación I-V, que relaciona la corriente generada a través del voltaje de la celda y los parámetros del modelo como se ve en la ecuación (2.1), en donde, I es la corriente en el circuito externo de la celda, V es el voltaje proporcionado por la celda, I_{sc} corresponde a la corriente en corto circuito, también conocida como corriente fotogenerada, I_0 es la corriente de saturación. Además, en la ecuación, q es la carga del electrón, n es el factor de idealidad, k es la constante de Boltzmann y T representa a la temperatura de la celda solar.

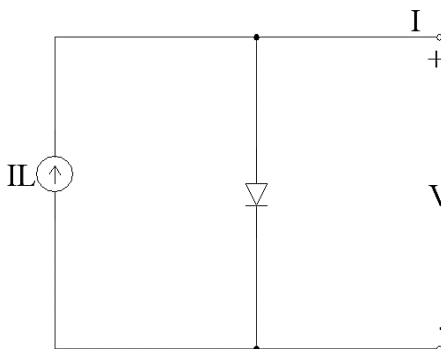


Figura 2.8. Modelo eléctrico de una celda solar ideal.

$$I = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

En condiciones reales, al modelo eléctrico ideal se añaden una resistencia en serie y una resistencia en paralelo, como se muestra en la Figura 2.9. Con estas dos resistencias, las características I-V de la celda está dada por la ecuación (2.2).

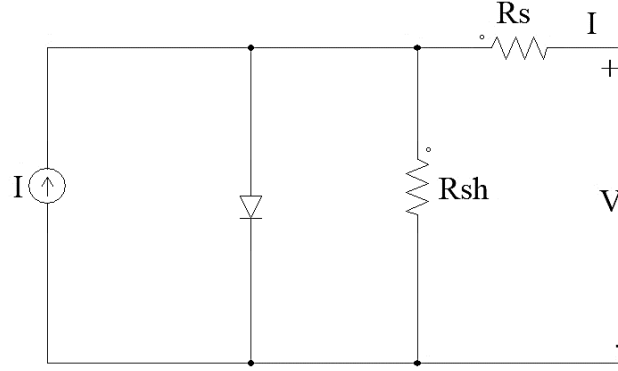


Figura 2.9. Modelo eléctrico de una celda solar con efectos resistivos.

$$I = I_{sc} - I_o \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

Las curvas I-V son de vital importancia al brindar información crucial sobre el estado de cada panel solar en diversas situaciones de operación. Este análisis desempeña un papel esencial en asegurar que los paneles solares funcionen de manera óptima en todas las etapas, desde su fabricación hasta su instalación y utilización. Estas curvas son comúnmente comparadas con las proporcionadas por los fabricantes en condiciones controladas, representando la relación entre la corriente y el voltaje de salida a medida que varía la carga. Este análisis se realiza considerando la influencia de factores como la irradiancia solar y la temperatura. En una curva característica I-V, se encuentran varios parámetros cruciales que determinan el rendimiento de cada panel solar, como se ilustra en la Figura 2.10. Algunos puntos clave a considerar en el rango de operación son la corriente de corto circuito I_{sc} que representa la máxima corriente disponible del panel solar con un voltaje igual a cero y el voltaje en circuito abierto V_{oc} representa el máximo voltaje suministrado por el panel solar a una corriente cero, cuando no hay ninguna carga conectada.

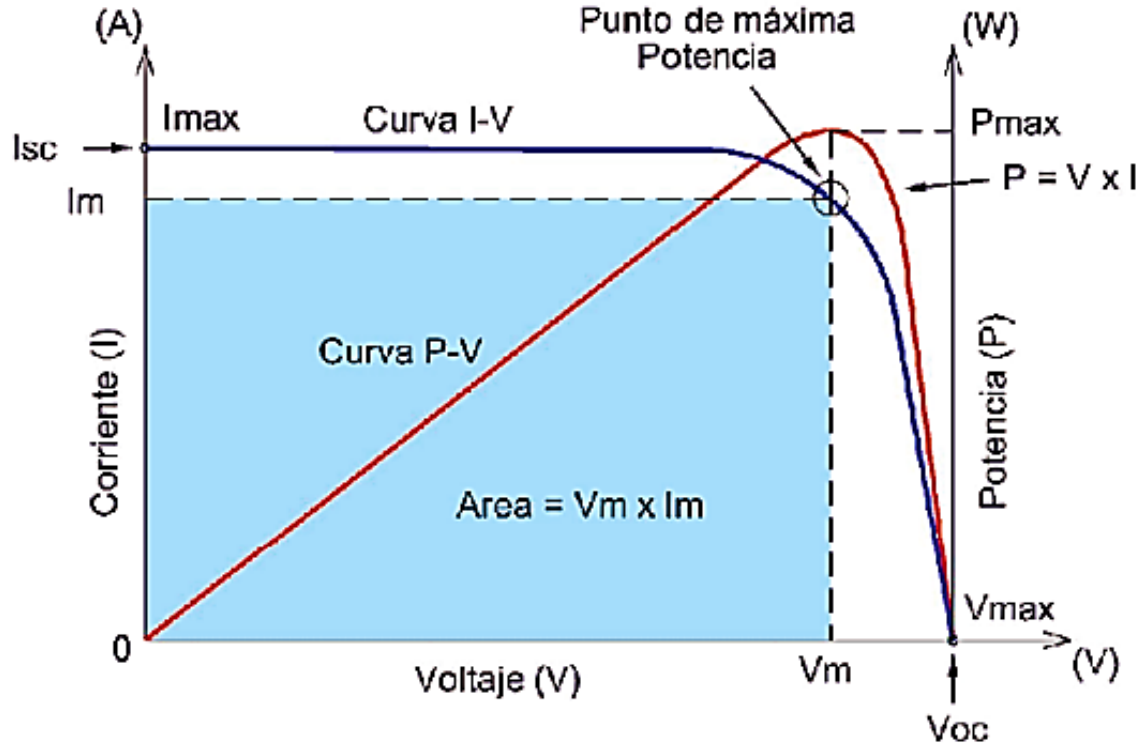


Figura 2.10. Curva característica I-V de una celda solar. [5]

En el punto de operación de máxima potencia, el producto de la corriente I_m y el voltaje V_m alcanza un valor máximo P_{mpp} , (ecuación (2.3)).

$$P_{mpp} = I_m * V_m \quad (2.3)$$

El factor de llenado o Fill Factor es uno de los parámetros que determina la eficiencia de la celda o panel solar. Este factor de llenado se define por el cociente de la máxima potencia P_{mpp} entre el producto de la corriente de corto circuito I_{sc} por el voltaje en circuito abierto V_{oc} como se muestra en la ecuación (2.4). Un factor de llenado alto indica un índice de calidad mayor de la celda o panel solar.

$$FF = \frac{P_{mpp}}{(V_{oc})(I_{sc})} = \frac{(V_m)(I_m)}{(V_{oc})(I_{sc})} \quad (2.4)$$

La eficiencia de una celda solar es una métrica que refleja la capacidad de la celda para transformar eficazmente la energía solar en electricidad utilizable. Esta eficiencia se representa en forma de porcentaje y se determina mediante la aplicación de la ecuación (2.5), donde A es el área de la celda o panel solar y G (global) es la irradiancia solar.

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{A G} * 100 \quad (2.5)$$

Las curvas I-V de un panel solar están influenciadas por factores tales como la temperatura y la intensidad de la luz solar incidente, además de las resistencias parasitarias R_s y R_{sh} que ejercen un impacto considerable en los niveles de eficiencia y en el factor de llenado.

El incremento de la temperatura afecta negativamente la eficiencia de una celda solar, al incrementar la corriente de saturación que lleva a una disminución en el voltaje en circuito abierto V_{oc} . La intensidad de la radiación solar afecta a la corriente de corto circuito, que es directamente proporcional a dicha intensidad.

Con relación a la resistencia en serie R_s y en paralelo R_{sh} , ambas provocan la degradación del factor de llenado, como se observa en la Figura 2.11 (a).

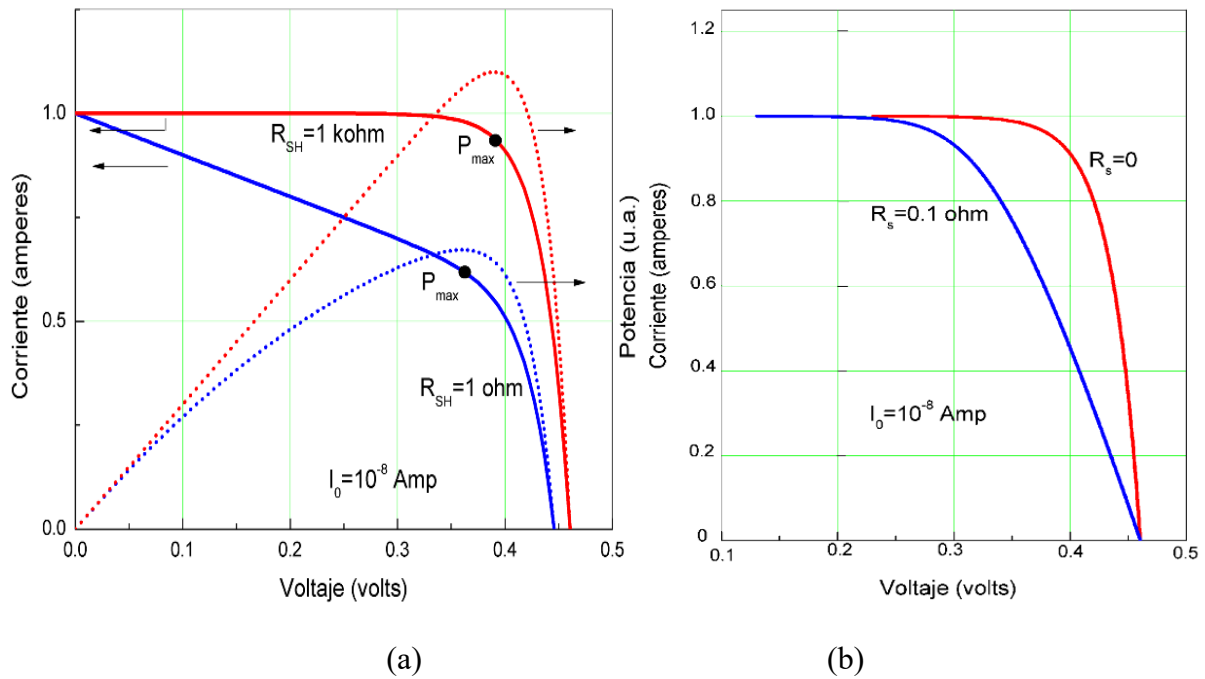


Figura 2.11. Efectos de la resistencia (a) paralelo y (b) serie sobre las características I-V de una celda solar. [2]

2.3 Electroluminiscencia de paneles solares de silicio

Al aplicar un voltaje en polarización directa a un panel solar, se produce una inyección de electrones y agujeros hacia las zonas neutras de la unión P-N. Posteriormente, la recombinación de electrones y agujeros en las zonas neutras puede dar origen a un fotón

electroluminiscente. En paneles solares de silicio, la electroluminiscencia se produce en la parte infrarroja del espectro electromagnético, lo que significa que la luz emitida no es visible para el ojo humano. Aunque la electroluminiscencia en silicio es de débil intensidad, se utiliza como una herramienta de diagnóstico para evaluar la calidad y la condición de los paneles solares. El análisis de electroluminiscencia emitida por un panel solar nos permite detectar posibles defectos, como grietas y áreas dañadas, que podrían afectar el rendimiento y la eficiencia de los paneles solares.

Desde el punto de vista de las transiciones electrónicas entre la banda de conducción y la banda de valencia, se distinguen semiconductores de ancho de banda directa e indirecta. Si el nivel mínimo de la banda de conducción está alineado a la banda de valencia y el nivel máximo de la banda de valencia están colocados en el centro de la zona de Brillouin ($k=0$), se dice que el semiconductor tiene un ancho de banda directo (Figura 2.12 (a)), esto se puede observar en los elementos de la familia III-V, como GaN y GaAs, y, por consiguiente, se tiene una probabilidad mayor de emitir un fotón. Si, en contraste, la banda de conducción no está alineado a la banda de valencia, tendrá una recombinación indirecta (Figura 2.12 (b)), como pasa en los materiales de silicio y germanio, y por consiguiente la probabilidad de emitir un fotón será baja.

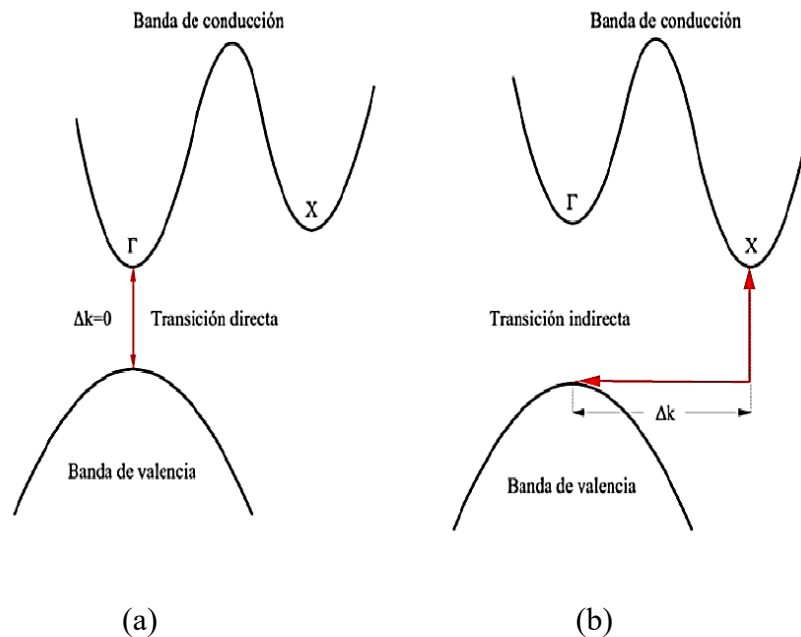


Figura 2.12. Estructuras de bandas de un semiconductor y transiciones interbandas en (a) un semiconductor con ancho de bandas directa y (b) indirecta. [2]

Cada que se hace la recombinación del par electrón-agujero se puede liberar un fotón del material cuya longitud de onda está relacionada con la brecha prohibida del silicio, que es de aproximadamente 1.14 eV.

La recombinación de un par electrón agujero puede producirse a través de dos caminos, directamente de la banda de conducción a la banda de valencia, o bien, a través de un nivel en medio de la banda prohibida. En el primer caso, la recombinación produce un fotón electroluminiscente (recombinación radiativa), mientras que en el segundo la energía se disipa en forma de calor (recombinación no radiativa). Estos dos procesos están ilustrados en la Figura 2.13.

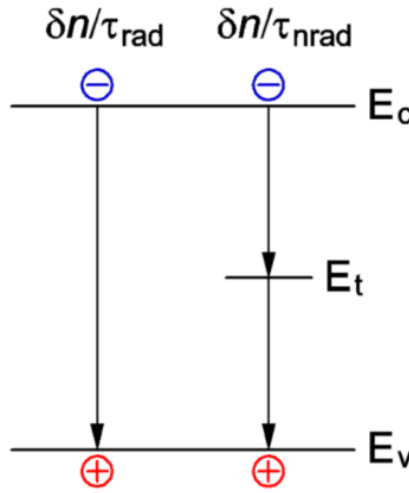


Figura 2.13. Recombinación radiativa y no radiativa. [2]

La eficiencia cuántica para la producción de fotones se define como la fracción de pares recombinados que dan origen a un fotón electroluminiscente. En otras palabras, es una medida de la probabilidad de que un electrón excitado en la celda solar libere un fotón en lugar de perder su energía en forma de calor. La eficiencia cuántica está definida en la ecuación (2.6), en donde δn es la densidad de pares electrón agujero generados por la excitación, τ_{rad} es el tiempo de vida radiativo y τ_{nrad} es el tiempo de vida no radiativo.

$$\eta = \frac{\# \text{ pares recombinados radiativamente}}{\# \text{ total de pares recombinados}} = \frac{\delta n / \tau_{rad}}{\delta n / \tau_{rad} + \delta n / \tau_{nrad}} \quad (2.6)$$

$$= \frac{\tau_{nrad}}{\tau_{nrad} + \tau_{rad}}$$

2.3.1 Defectos en los paneles solares mediante electroluminiscencia

Algunos defectos que se detectan en los paneles solares al medir la electroluminiscencia pueden ser perjudiciales para la eficiencia del panel solar. En este sentido, aún defectos pequeños que no afectan negativamente la operación de la celda con el tiempo podrían convertirse en defectos más grandes y afectar sensiblemente al panel solar. Algunos de los defectos de un panel solar pueden ocasionarse durante la fabricación, la transportación o la instalación del panel.

Los defectos que se presentan en la celda solar pueden ser causados por la calidad del material del que están hechos, que afectan su eficiencia cuántica para producir un fotón electroluminiscente. De este modo, la intensidad electroluminiscente será una medida de la calidad del material con el que está hecho el panel.

Algunos de los defectos significativos que se presentan en las celdas son las grietas en la forma de líneas pequeñas no visibles al ojo humano, que se caracterizan por su propagación entre un contacto a otro, como se muestra en la Figura 2.14 con flechas rojas. Las grietas pueden ser ocasionadas durante el ensamblaje de las celdas solares debido a la baja calidad del material. En algunos casos, estas grietas pueden ocasionar roturas, como las señaladas en círculos blancos en la Figura 2.14. Las babas de caracol o snail trails son alteraciones en la lámina de encapsulación del módulo fotovoltaico. La aparición de estas babas de caracol está asociada a la presencia de grietas en las celdas solares que provocan que la humedad atraviese fácilmente desde la parte trasera hasta la cara frontal del panel solar como se observa en la Figura 2.14 en el rectángulo verde. Los dedos rotos señalados en la Figura 2.14 en el rectángulo amarillo, estos pueden surgir desde la fabricación, ocasionando una interrupción del contacto eléctrico de la celda. La heterogeneidad de la celda puede ocasionar las áreas oscuras que se marcan con los círculos morados en la Figura 2.14. Esta heterogeneidad puede estar relacionada a defectos estructurales y con la calidad del material (anchos de banda prohibida y eficiencia cuántica heterogéneos).

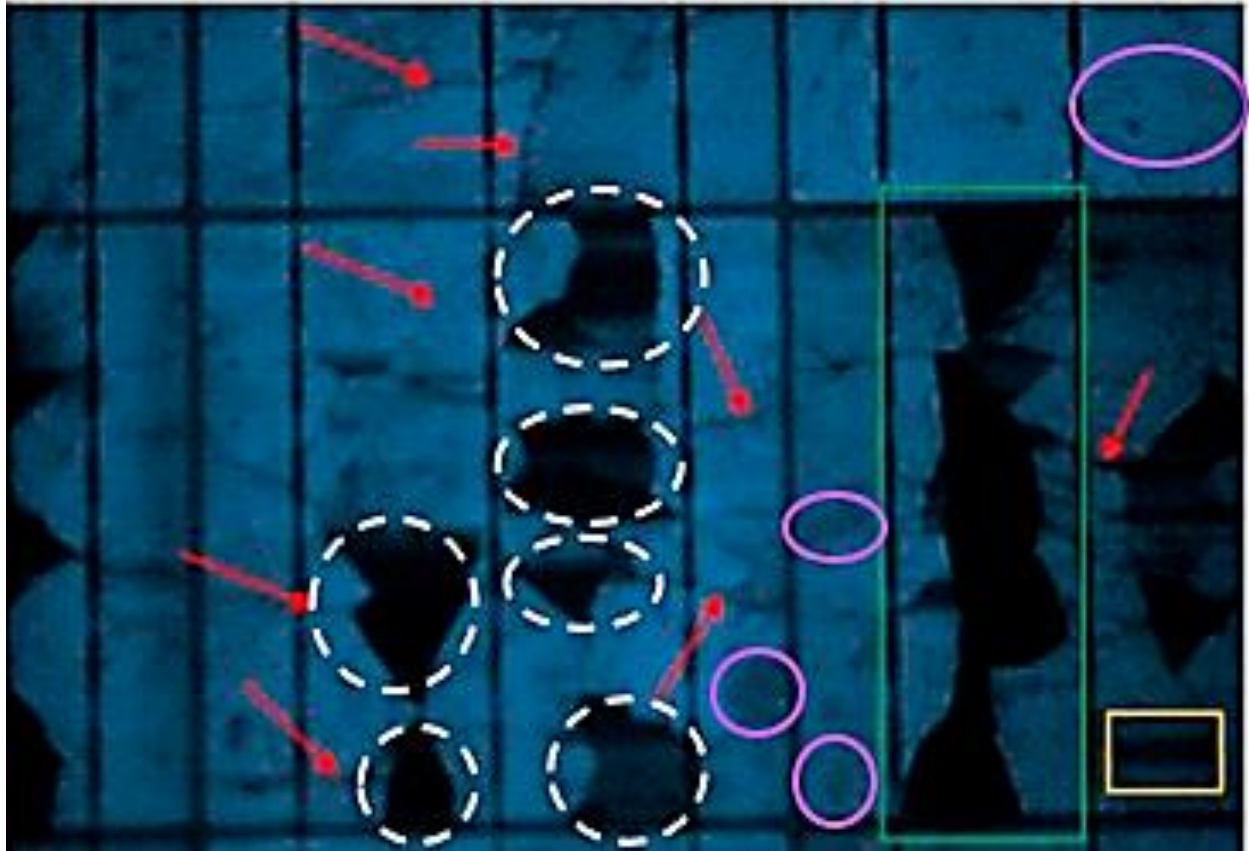


Figura 2.14. Defectos encontrados en un panel solar policristalino de Canadian Solar. Grietas (flechas rojas), huellas de caracol (rectángulo verde), roturas (círculos blancos), dedos rotos (rectángulo amarillo) y la heterogeneidad cristalina (círculos morados). [6]

Capítulo 3

Arreglos experimentales para la caracterización eléctrica y óptica de paneles fotovoltaicos de silicio

3.1 Toma de imágenes de electroluminiscencia

Para garantizar la precisión de la toma de las imágenes de electroluminiscencia a los paneles solares se prepara un cuarto oscuro en el laboratorio de energía solar del Instituto de Investigación de Comunicación Óptica (IICO) eliminando por completo cualquier fuente de luz del espectro visible, incluyendo la luz de las lámparas incandescentes. En la toma de electroluminiscencia es utilizada una fuente de poder BK Precision 9110 que permite ajustar un voltaje entre 0 a 60 V_{cc} y una corriente entre 0 a 5 A para los distintos paneles solares con los que se cuenta, esta fuente se conecta a las terminales del panel solar a medir, y con la cámara configurada en el cuarto oscuro a un tiempo de exposición de 20 segundos y una velocidad ISO de 1250, estos ajustes permiten capturar la mayor luz irradiada por el panel solar, se toma una fotografía cuando se inyecta la corriente y el voltaje necesario para que el panel solar emita la luz suficiente, y las imágenes se transfieren a una PC (ver Figura 3.1).

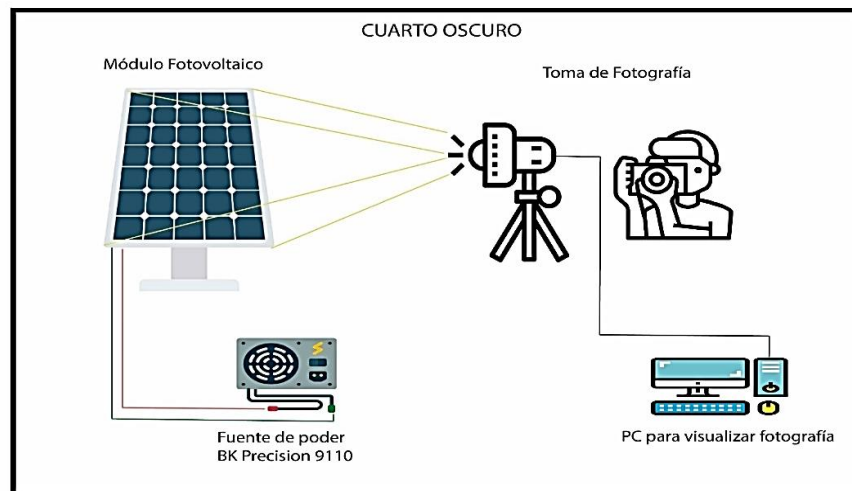


Figura 3.1. Esquema para la toma de electroluminiscencia de los paneles solares.

La medición implica utilizar una cámara fotográfica comercial CANON EOS 50D, este tipo de cámaras comerciales suelen contar con un filtro conocido como espejo caliente que permite el paso de la luz visible y descarta el paso de la luz infrarroja. Sin embargo, para llevar a cabo la medición de electroluminiscencia se reemplaza el espejo caliente por un filtro de infrarrojos R72, el cual está diseñado para fotografiar en el espectro infrarrojo. El filtro R72 bloquea la luz del espectro visible y permite el paso de los rayos del espectro infrarrojo por encima de los 720 nm, esto posibilita la captura de los fotones emitidos por el panel solar entre los 1000 nm a 1200 nm. En la Figura 3.2 (a), se observa el retiro del espejo y en la parte b se muestra cómo se reemplaza por un filtro infrarrojo R72, lo que permite capturar el espectro infrarrojo en una fotografía.

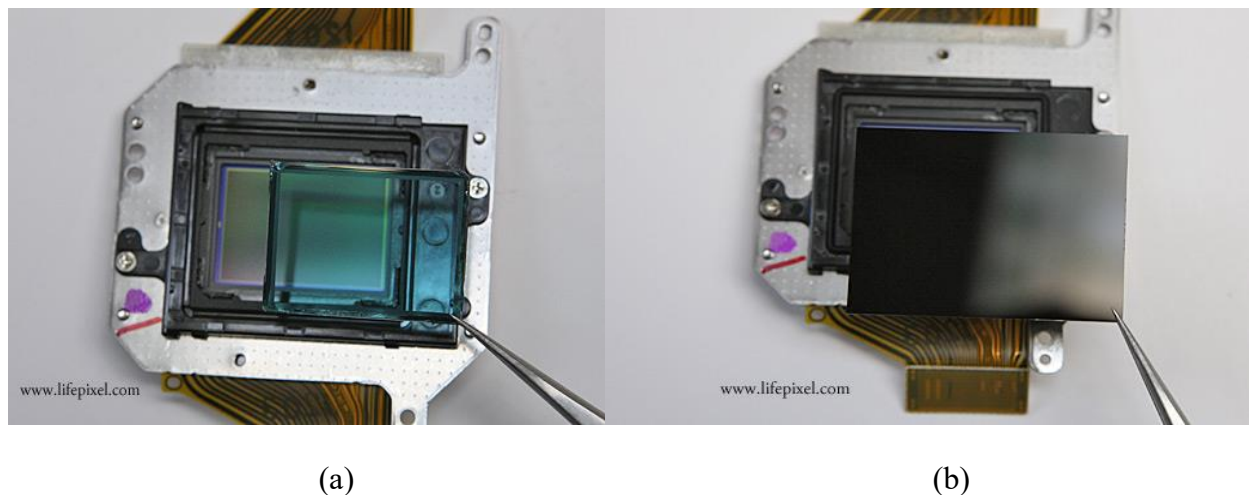


Figura 3.2. (a) Retiro del espejo caliente de bloqueo de infrarrojos. (b) Instalación del nuevo filtro de infrarrojos R72 para la conversión de la cámara. [7]

Para obtener una óptima irradiancia de luz infrarroja y, por ende, una captura de imagen de electroluminiscencia de calidad, se inyecta un voltaje y una corriente específicos para cada tipo de panel solar, estos valores se detallan en la Tabla 3.1.

Tipo de panel	Corriente (I)	Voltaje (V)	Tiempo de exposición	ISO
Policristalino	2.65 A	37.6 V	20 s	1250
Monocristalino	1.63 A	61 V	20 s	1250

Tabla 3.1. Parámetros eléctricos y fotográficos fundamentales utilizados para la adquisición de imágenes de electroluminiscencia

3.2 Estación de pruebas de paneles solares

Para la obtención de las curvas características I-V se ha utilizado la estación de pruebas de paneles solares instalado en el Instituto de Investigación en comunicación óptica, que se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Estación de pruebas de paneles solares instalado en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica.

La estación de pruebas de paneles solares mide parámetros ambientales como la temperatura ambiente, humedad, velocidad y dirección del viento y la radiación solar, parámetros del panel solar como el voltaje y la corriente que circulan y la temperatura promedio, y, por último, obtiene los parámetros eléctricos mostrados en la Figura 2.10, como la potencia máxima, el factor de llenado, la eficiencia, la corriente en corto circuito y el voltaje en circuito abierto.

La medición de las curvas características I-V se llevó a cabo por medio de la estación de pruebas de paneles solares construida anteriormente (De León, 2015). Además de medir características I-

V, permite controlar el ángulo de incidencia de los rayos del sol y realiza mediciones meteorológicas relevantes en el proceso. Para asegurar un rendimiento óptimo, se llevaron a cabo modificaciones en el software original de funcionamiento, estas mejoras se detallan en el apéndice A.

La estación de pruebas de paneles solares se basa en la utilización de un MOSFET de potencia eléctrica modelo SD 4933 controlado por un CompactRIO 9012 de la empresa National Instruments. El método consiste en la polarización de la compuerta de un FET para llevar a cabo un barrido de la tensión de voltaje desde $0 V_{dc}$ con incremento de $0.01V_{dc}$ hasta alcanzar $4.5V_{dc}$. Para medir la variación de corriente cuando se activa el transistor FET, se emplea un sensor HY 15P. El FET está conectado en serie al sensor de corriente y así mismo con el panel solar y se realiza la medición con el módulo NI9263 que proporciona el voltaje con el cual se realiza el barrido en la compuerta del FET, y el NI9221 recibe el voltaje del panel a lo largo del barrido, el circuito se muestra en la Figura 3.4.

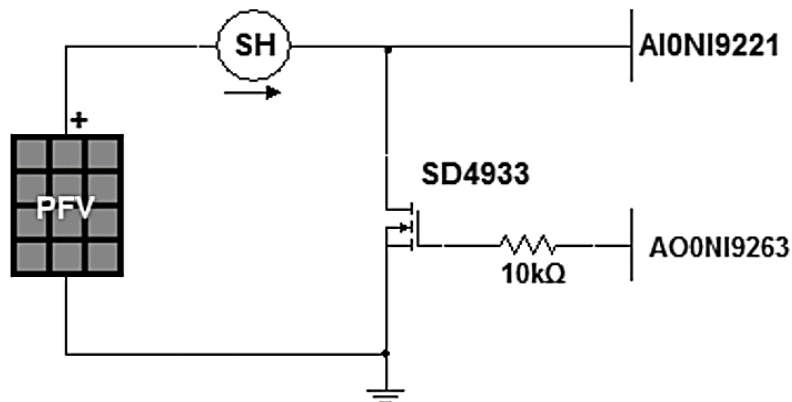


Figura 3.4. Circuito generador de curva característica IV. [8]

Este sistema se ve complementado con una serie de SubVI's (Virtual Instruments Secundarios) diseñados para medir los parámetros ambientales, capturar los datos de análisis de la curva características I-V y permitir el posicionamiento manual del panel solar por parte del usuario. La integración de estos SubVI's en el sistema resulta en la interfaz de usuario mostrada en la Figura 3.5, que proporciona una experiencia completa y eficiente.

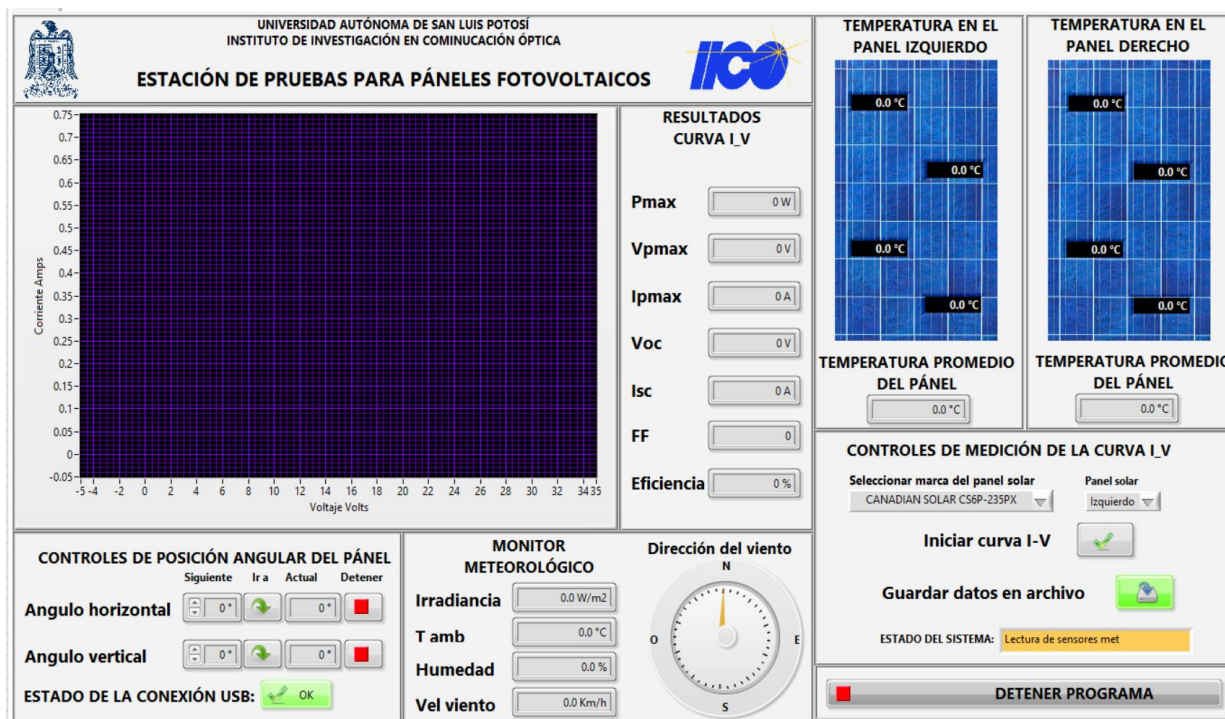


Figura 3.5. Rediseño del panel de control del programa de la estación de pruebas de paneles solares.

El método seleccionado para la adquisición de las curvas características I-V implica el montaje de dos paneles solares de la misma marca en la estación de pruebas de paneles solares. Luego, se orientan los paneles de manera perpendicular a los rayos del sol para aprovechar al máximo la irradiancia solar disponible. A continuación, se procede a la toma de las curvas características I-V de cada uno de estos paneles solares. Una vez completada la adquisición de datos, se almacenan los archivos que contienen la información de las curvas I-V para su posterior análisis y evaluación. Este enfoque permite comparar y evaluar el rendimiento de los dos paneles solares bajo las mismas condiciones ambientales y de iluminación, lo que es esencial para la investigación y el desarrollo en el campo de la energía solar.

3.3 Modelado matemático de las curvas características I-V mediante el método de Newton-Raphson

Con el objetivo de obtener una mejor caracterización de los paneles se hizo un modelado de las curvas I-V utilizando un ajuste de las curvas experimentales a la ecuación (2.2). El ajuste se hizo utilizando el método iterativo de Newton-Raphson, que es una herramienta para la resolución de ecuaciones no lineales, permitiéndonos calcular sus raíces con alta eficiencia, siempre que

dispongamos de una aproximación inicial cercana a la solución deseada. Esta aproximación inicial, conocida como "punto de partida", es esencial para el éxito del método. El algoritmo se basa en expansiones de series de Taylor centradas en un punto x_n . Al generalizar este proceso, obtenemos la fórmula (3.1), que se utiliza para calcular sucesivas aproximaciones a la raíz. La expresión es crucial en el método y se presenta en la ecuación (3.1):

$$X_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.1)$$

Esta fórmula nos indica cómo actualizar la estimación de la raíz en cada iteración. Aquí, $f(x_n)$ representa la función que estamos intentando resolver, $f'(x_n)$ es su derivada y x_n es la estimación actual de la raíz. Al aplicar esta fórmula en un proceso iterativo, nos acercamos progresivamente a la solución deseada, siempre que partamos de una estimación inicial adecuada. El método de Newton-Raphson es ampliamente utilizado en matemáticas y ciencias de la ingeniería para abordar una amplia variedad de problemas no lineales.

Utilizando las ecuaciones correspondientes de las características eléctricas de una celda solar, la ecuación (3.1) se convierte en la ecuación (3.2), teniendo en consideración que V_a se obtiene como el cociente entre el Voltaje y N_s , que representa el número de celdas solares conectadas en serie, V_t que es el resultado de multiplicar el factor de idealidad, la constante de Boltzmann y la temperatura promedio del panel, dividido por la carga del electrón, y la variable I con un valor inicial en cero para el método.

$$I = I - \frac{I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V_a + IR_s}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_a + IR_s}{R_{sh}}}{-1 - I_o \left[\frac{R_s}{V_t} * \exp\left(\frac{V_a + IR_s}{V_t}\right) \right] - \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (3.2)$$

Para modelar los aspectos eléctricos de los paneles solares, se emplea un programa desarrollado en Wolfram Mathematica, creado por el Dr. Miguel Ángel Lastras Montaña. Este programa realiza un ajuste de parámetros para minimizar el error en una ecuación y, de esta manera, determinar valores clave como la corriente de saturación (I_o), resistencia en serie (R_s) y resistencia en paralelo (R_{sh}). Luego, se utiliza un archivo con extensión .m en MATLAB (consulte el Apéndice B para más detalles) para generar el modelado de los paneles solares utilizando los parámetros de ajuste proporcionados por el programa de Mathematica. Además de crear las curvas características I-V, este programa de MATLAB calcula valores importantes, como la desviación estándar, la

media y el coeficiente de variación. Estos valores se utilizan posteriormente en el análisis de imágenes de electroluminiscencia, tal como se describe en la sección 3.4. Esta comparación entre las curvas características I-V y las imágenes de electroluminiscencia es esencial para evaluar y comprender el rendimiento de los paneles solares en estudio.

3.4 Parámetros para el análisis de las imágenes de electroluminiscencia

Para analizar las imágenes de electroluminiscencia, se ha incorporado una sección en el mismo archivo .m de MATLAB. En esta sección, se lleva a cabo un procesamiento estadístico de la imagen de electroluminiscencia, que implica su conversión a escala de grises y un análisis pixel a pixel para calcular la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Estos cálculos estadísticos proporcionan una comprensión básica del comportamiento de la electroluminiscencia en la imagen, lo que permite extraer conclusiones significativas. El programa genera estos valores estadísticos tanto para el panel solar en su conjunto como de manera individual para diferentes áreas de la imagen, segmentando el análisis por la cantidad de píxeles. Este enfoque permite un análisis detallado y completo de la electroluminiscencia, lo que facilita la interpretación de los resultados y la evaluación del rendimiento del panel solar en diferentes regiones de la imagen.

En este trabajo de tesis, cada píxel se evaluará en función de su intensidad, que será considerada como la intensidad electroluminiscente (I). Este análisis tiene como objetivo medir el nivel de luminosidad de cada píxel en una imagen. En términos generales, la intensidad se refiere a la cantidad de brillo presente en cada píxel de la imagen.

La desviación estándar o varianza (ΔI) representa la diferencia entre los niveles de brillos de los píxeles y su valor de intensidad. En este contexto, se utiliza para evaluar el contraste y determinar cuán alejados están los valores de brillo de cada píxel con respecto a la media general de la imagen analizada. Cuando la desviación estándar es baja, esto sugiere que todos los píxeles presentan un brillo muy cercano a la media, lo que indica una mayor homogeneidad en la celda o panel solar. En contraste, una desviación estándar alta indica que los valores de brillo están más dispersos con respecto a la media, lo que sugiere una mayor heterogeneidad en la celda o panel solar. En resumen, la desviación estándar proporciona información importante sobre la variabilidad y uniformidad de la intensidad de la electroluminiscencia en la imagen analizada, y la fórmula a utilizar se muestra en la ecuación (3.3).

$$\Delta I = S = \sqrt{\sum (I - \bar{I})^2} \quad (3.3)$$

El coeficiente de variación (CV) se utiliza para evaluar la variabilidad de los niveles de brillo de los píxeles en relación con la intensidad electroluminiscente o la media de toda la imagen del panel solar, como se indica en la ecuación (3.4). Este coeficiente se ajusta para tener una escala sin unidades, lo que permite su uso en lugar de la desviación estándar. Un valor mayor del coeficiente de variación indica una mayor dispersión de datos en las imágenes de electroluminiscencia, lo que sugiere una mayor heterogeneidad en la distribución de intensidades. Por otro lado, cuando el valor del coeficiente de variación se acerca a 1, se refleja una heterogeneidad en la intensidad de la electroluminiscencia. En contraposición, cuando el coeficiente de variación tiende a 0, esto indica que la intensidad es más homogénea en el panel solar. El coeficiente de variación resulta fundamental para comparar la homogeneidad entre diferentes paneles solares, lo que proporciona información valiosa para el análisis y la evaluación comparativa de dichos paneles.

$$CV = \frac{\Delta I}{I} \quad (3.4)$$

Capítulo 4

Resultados experimentales: Caracterización eléctrica y electroluminiscente de paneles solares de silicio

En este trabajo de tesis, se llevó a cabo un análisis de cuatro marcas diferentes de paneles solares comerciales. De estas marcas, los paneles de la marca Solarnorte, Solartec y Canadian solar se caracterizan por ser paneles solares policristalinos, mientras que la marca Qcells se destaca por ofrecer paneles solares monocristalinos. Se seleccionaron aleatoriamente diversos paneles solares de cada una de estas cuatro marcas que se encuentran disponibles en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO).

Cada panel solar que se va a medir se encuentra identificado por una letra del abecedario, lo cual facilita una gestión más eficiente de la información al momento de llevar a cabo el análisis de cada uno de los paneles solares, tal como se detalla en la Tabla 4.1. Esta nomenclatura alfabética se ha implementado para asegurar una organización clara y efectiva de los datos asociados a cada panel solar, lo que simplifica el seguimiento y la interpretación de los resultados a lo largo del estudio.

Panel solar	Identificador	Panel solar	Identificador
Qcells 1	a	Solartec 2	f
Qcells 2	b	Canadian solar 1	g
Solarnorte 1	c	Canadian solar 2	h
Solarnorte 2	d	Canadian solar 3	i
Solartec 1	e	Canadian solar 4	j

Tabla 4.1. Asignación del identificador para cada uno de los diez paneles solares medidos.

En la Tabla 4.2 se presentan las especificaciones eléctricas proporcionadas por los fabricantes en sus hojas de datos, que se obtuvieron bajo las condiciones de prueba STC (Standard Test Conditions), para los cuatro tipos de marcas de paneles solares que se consideraron para este análisis. Estas características eléctricas son esenciales para comprender y evaluar el rendimiento de los paneles solares en el estudio.

Panel solar	Qcells Q. Peak L-G5 370	Solarnorte 265-60P	Solartec S60PC-250	Canadian Solar CS6P-235PX
Tipo	Monocristalino	Policristalino	Policristalino	Policristalino
Tamaño [mm]	1994 x 1000 x 35	1640 x 992 x 35	1640 x 992 x 40	1638 x 982 x 40
# de celdas	72 (6 x 12)	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)	60 (6 x 10)
P_{max} [W]	370	265	250	235
V_{MP} [V]	39.59	31.00	30.12	29.80
I_{MP} [A]	9.35	8.54	8.30	7.90
V_{oc} [V]	48.45	38.10	37.85	36.90
I_{sc} [A]	9.81	9.08	8.65	8.46
η [%]	≥ 18.6	16.32	15.29	14.61

Tabla 4.2. Características eléctricas proporcionadas por los fabricantes de las cuatro marcas de paneles solares a analizar.

El panel solar se divide en secciones por celdas con el propósito de facilitar la identificación y el análisis preciso. Esta división implica la creación de filas y columnas, que varían en número según la cantidad de celdas que componen el panel. Puede observarse un ejemplo visual de esta división en la Figura 4.1 para los paneles policristalinos. En el caso de los paneles monocristalinos, se agrega un par de columnas adicionales en el lado derecho para acomodar su estructura particular como se muestra en la Figura 4.2.

Imagen original seccionada

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

Figura 4.1. Numeración de las celdas de los paneles solares policristalinos.

Imagen original seccionada

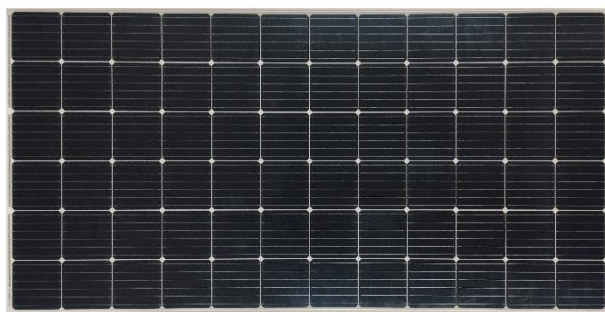
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72

Figura 4.2. Numeración de las celdas de los paneles solares monocristalinos.

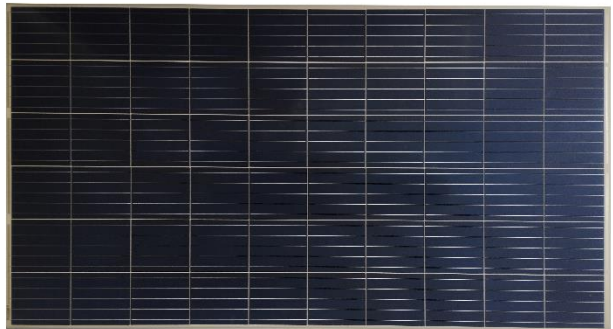
Se realizaron múltiples mediciones a cada panel solar, comenzando con la captura de imágenes a vista óptica de cada panel solar, posteriormente se tomaron las imágenes de electroluminiscencia en el cuarto oscuro, como se detalló en la sección 3.1. Después se llevaron a cabo mediciones en la estación de pruebas de paneles solares para obtener las curvas I-V en un día despejado. Y, por último, se procedió a realizar el análisis de estos datos mediante programas desarrollados en

MATLAB, lo que permitió obtener las características eléctricas de los paneles y llevar a cabo el análisis de las imágenes de electroluminiscencia, tal como se describió en la sección 3.3.

En la Figura 4.3 se puede observar que, a simple vista, los paneles solares analizados no presentan indicios visibles de detalles o defectos que sugieran daños o una eficiencia baja. Sin embargo, es fundamental recordar que los problemas potenciales en las celdas solares pueden no ser evidentes a simple vista. Por lo tanto, se lleva a cabo un análisis interno de las celdas solares mediante el procesamiento estadístico de las imágenes de electroluminiscencia. Además, se utiliza la estación de pruebas de paneles solares para determinar la eficiencia entregada por cada panel en un día soleado. Este análisis integral garantiza una evaluación completa y precisa de los paneles solares, lo que es esencial para comprender su desempeño y calidad.



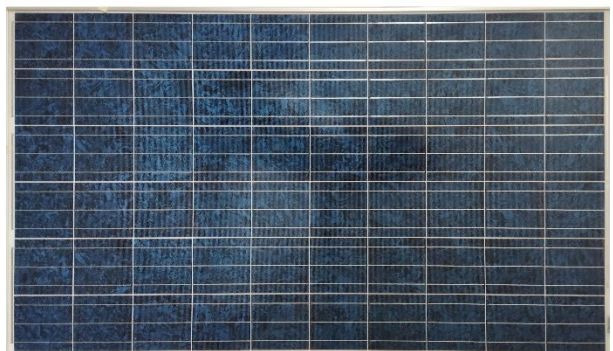
Qcells



Solarnorte



Solartec



Canadian solar

Figura 4.3. Imágenes ópticas de los paneles analizados.

Las curvas características I-V de los diez paneles solares desempeñan un papel crucial en la evaluación de su eficiencia y rendimiento. En este estudio, el panel solar Qcells 2 se ha destacado como el más eficiente de todos, este panel entrega una potencia máxima de 310.73 W y alcanza una eficiencia del 17.70% a una temperatura de 62.50 °C como se ilustra en la Figura 4.4 (b), esta eficiencia es extremadamente cercana a la especificada por el fabricante, que es del 18.6%. La diferencia entre la eficiencia observada y la eficiencia especificada es mínima, lo que se traduce en una pérdida de eficiencia insignificante del 0.96%. Además, esta pérdida solo representa alrededor de 59.69 W, lo que es altamente aceptable. En comparación, el panel Qcells 1 muestra una potencia máxima de 310.31 W y una eficiencia del 17.60% a una temperatura de 62.70 °C como se observa en la Figura 4.4 (a), presentando una pérdida de alrededor de 59.27 W y una eficiencia cercana como el Qcells 2.

En cuanto a los paneles solares policristalinos, los paneles de la marca Solarnorte ocupan el segundo lugar en términos de eficiencia. En las curvas I-V de la Figura 4.4 (c) y (d), se pueden observar características eléctricas similares entre estos dos paneles. El panel Solarnorte 1 presenta una eficiencia del 12.09% a una temperatura de 61.45 °C y una radiación solar de 1088.22 W/m², generando una potencia eléctrica de 208.09 W. En comparación, el panel Solarnorte 2 muestra una eficiencia del 11.91% a una temperatura de 61.63 °C y una radiación solar de 1086.42 W/m², y una potencia eléctrica de 207.92 W. La eficiencia especificada por el fabricante es del 16.32%, lo que implica una diferencia del 4.41% con respecto a los paneles estudiados.

Los paneles solares de la marca Solartec, ocupan el tercer lugar en términos de eficiencia, con valores de eficiencia muy similares entre ellos. El panel Solartec 1 presenta una eficiencia del 10.91% a una temperatura de 60.71 °C y una radiación solar de 1087.33 W/m² mientras que el panel Solartec 2 presenta una eficiencia del 10.76% a una temperatura de 60.17 °C y una radiación solar de 1086.43 W/m². Es importante señalar que el fabricante especifica una eficiencia en STC del 15.29%, lo que indica una pérdida de eficiencia considerable del 4.5% en los paneles estudiados. Sus curvas I-V mostradas en la Figura 4.4 (e) y (f) muestran que son muy similares, con una potencia eléctrica de 191.09 W para el panel Solartec 1, y 188.64 W para el panel Solartec 2.

Y, por último, el análisis se continuó con los paneles de la marca Canadian solar. El panel Canadian solar 1 se identifica como el menos eficiente, generando una potencia de 181.43 W y

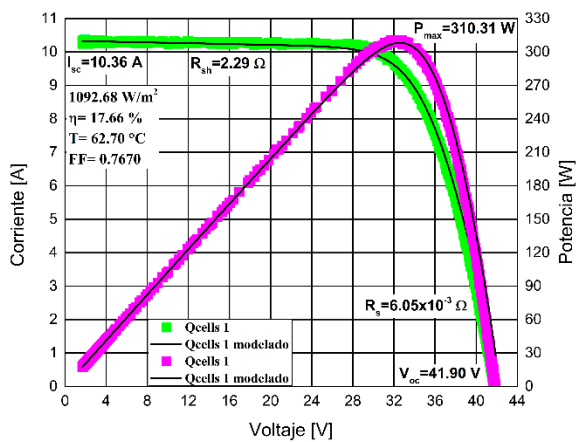
una eficiencia del 9.49% a una temperatura de 60.83 °C. Continuando con el panel Canadian solar 2 que demuestra una potencia eléctrica de 188.84 W, una eficiencia de 9.82% con una temperatura de 61.54 °C y una radiación solar de 1092.68 W/m², considerando mejores valores que los del panel Canadian solar 1. En contraste, el panel Canadian solar 3 se destaca como el más eficiente, alcanzando una eficiencia del 10.39% a una temperatura de 60.99 °C y una radiación solar de 1098.93 W/m². Este panel genera una potencia eléctrica de 193.13 W, seguido del panel Canadian solar 4, que presenta una eficiencia del 10.19% a una temperatura de 60.14 °C y una radiación solar de 1105.18 W/m², con una potencia eléctrica de 191.43 W (ver Figura 4.4 (i) y (j)).

Estos resultados son fundamentales para comprender cómo se comportan estos paneles en situaciones del mundo real, lo que ayuda a tomar decisiones informadas en la selección y uso de paneles solares en aplicaciones específicas. Además, estas evaluaciones brindan información valiosa para optimizar la eficiencia y el rendimiento de las instalaciones solares y contribuir al desarrollo sostenible de la energía solar.

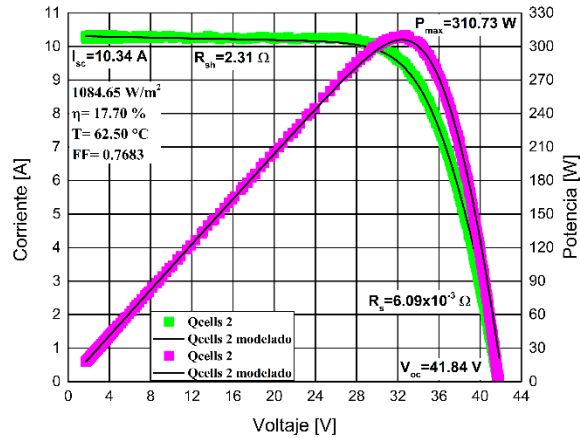
Algo que se puede confirmar en la Tabla 4.3, es que existe una relación entre la radiación solar incidente y la corriente de corto circuito (I_{sc}). A medida que la radiación solar aumenta, la corriente de corto circuito también tiende a aumentar. Este fenómeno se debe a que un incremento en la radiación solar resulta en una mayor cantidad de fotones que inciden en el panel solar, lo que, a su vez, genera una mayor cantidad de portadores de carga y, por ende, una mayor corriente eléctrica producida. Por otro lado, es interesante notar que el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) se mantiene relativamente constante o con variaciones mínimas en estas condiciones meteorológicas. Esto sugiere que, en las condiciones estudiadas, el voltaje en circuito abierto no se ve afectado de manera significativa por la radiación solar. Esto podría indicar que la variación en la radiación solar tiene un impacto mayor en la corriente generada por los paneles que en el voltaje.

Panel solar	# de celdas	P_{max} [W]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	R_s [mΩ]	R_{sh} [Ω]	FF	η [%]	T [°C]	Radiación solar $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Qcells 1	72	310.31	41.9	10.36	6.05	2.29	0.7670	17.66	62.70	1092.68
Qcells 2	72	310.73	41.84	10.34	6.09	2.31	0.7683	17.70	62.50	1084.65
Solarnorte 1	60	208.09	31.52	9.65	7.65	3.82	0.6375	12.09	61.45	1088.22
Solarnorte 2	60	207.92	31.46	9.58	6.50	2.10	0.6331	11.91	61.63	1086.42
Solartec 1	60	191.08	30.64	9.52	7.22	1.25	0.5938	10.91	60.71	1087.33
Solartec 2	60	188.64	30.30	9.51	7.22	1.25	0.5921	10.76	60.27	1086.43
Canadian solar 1	60	181.43	30.91	9.12	9.13	1.75	0.5380	9.49	60.83	1090.90
Canadian solar 2	60	188.84	31.09	9.10	7.96	1.09	0.5531	9.82	61.54	1092.68
Canadian solar 3	60	193.13	31.03	9.29	7.99	1.13	0.5782	10.39	60.99	1098.93
Canadian solar 4	60	191.43	31.00	9.27	7.99	1.13	0.5724	10.19	60.14	1105.18

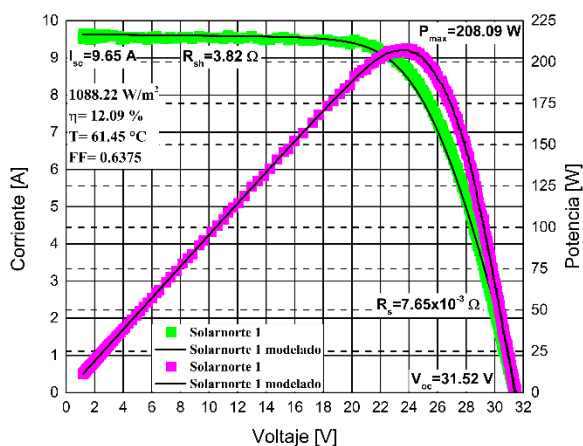
Tabla 4.3. Características eléctricas reales de los paneles solares.



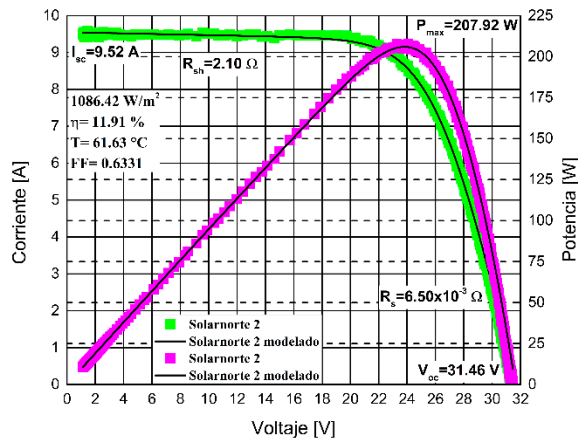
(a) Qcells 1



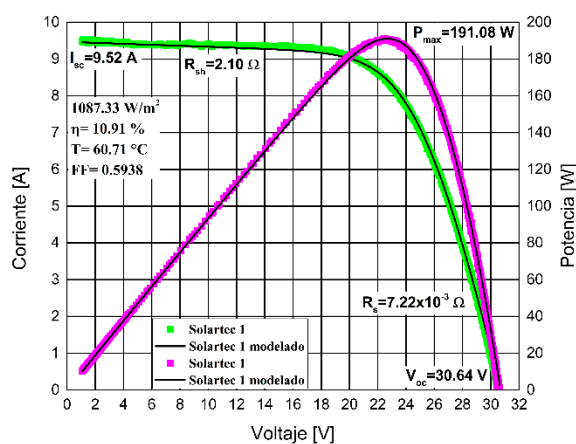
(b) Qcells 2



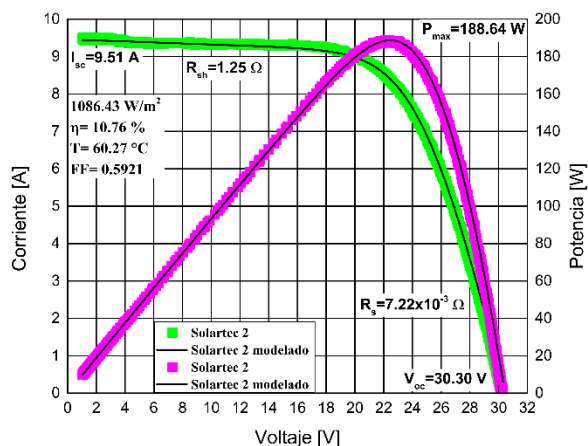
(c) Solarnorte 1



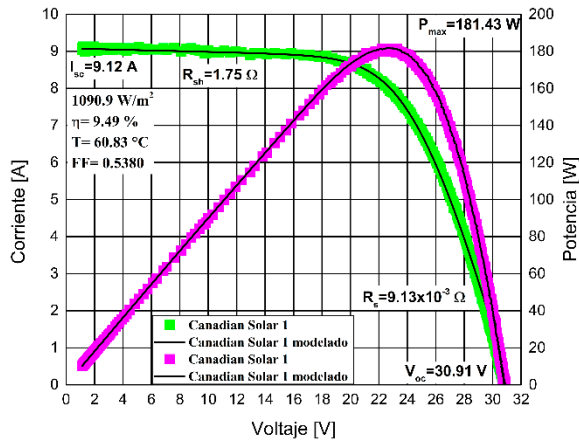
(d) Solarnorte 2



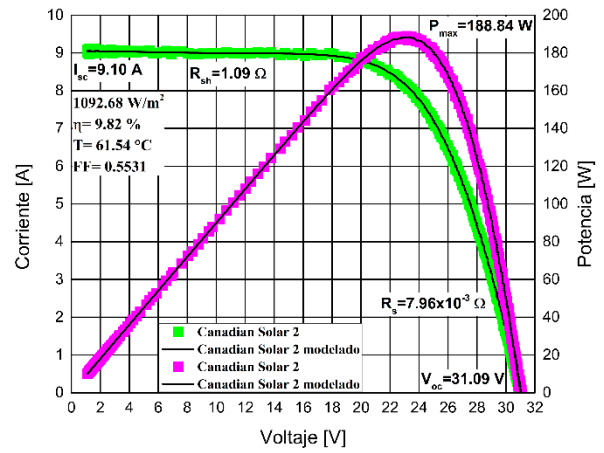
(e) Solartec 1



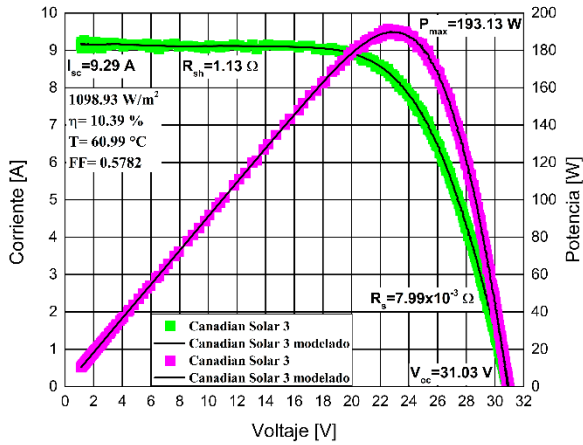
(f) Solartec 2



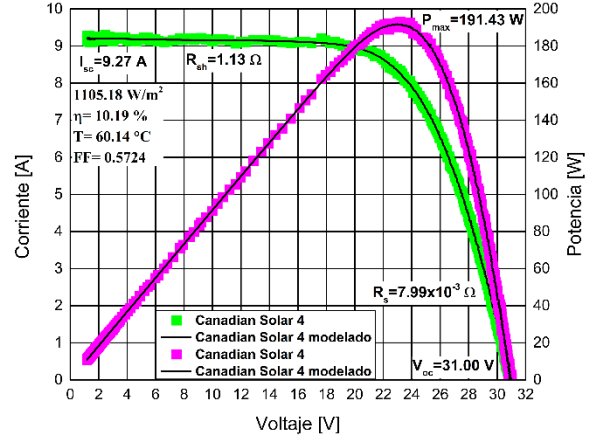
(g) Canadian solar 1



(h) Canadian solar 2



(i) Canadian solar 3



(j) Canadian solar 4

Figura 4.4. Curvas características I-V de los diez paneles solares con los distintos parámetros que determinan el rendimiento del panel solar.

En el proceso de obtención de imágenes de electroluminiscencia, se hizo uso del laboratorio de energía solar, teniendo en cuenta las condiciones específicas descritas en la Figura 3.1 y las configuraciones fotográficas con la cámara CANON EOS 50D detalladas en la Tabla 3.1. Esto es crucial para garantizar que las imágenes capturadas sean de alta calidad y proporcionen información precisa sobre el estado de los paneles solares.

La Figura 4.5 (a) muestra que el panel Qcells 1 tiene ciertas diferencias notables en la intensidad electroluminiscente entre sus celdas, algunas celdas son considerablemente más brillantes que otras, lo que sugiere una variación en el rendimiento de estas celdas individuales. En cambio, el panel Qcells 2 que se observa en la Figura 4.5 (b) muestra una degradación en la intensidad electroluminiscente menor en comparación con el Qcells 1. Sin embargo, se observa una grieta en la celda número 62, que, si no se aborda adecuadamente, podría crecer y afectar aún más el rendimiento.

Pasando a los paneles Solarnorte, el panel Solarnorte 1 presenta defectos como diferencias de intensidad entre celdas, con las celdas 25, 31 y 39 notoriamente más brillantes y una grieta en la celda 39 de estas 3 celdas. Además, se observan manchas oscuras debido a la heterogeneidad cristalina alrededor de aproximadamente 5 celdas y grietas que aún no aíslan completamente las celdas como se puede observar en la Figura 4.5 (c). En contraste, el panel Solarnorte 2 muestra una diferencia considerable en la intensidad electroluminiscente como se puede ver en la Figura 4.5 (d), especialmente en la fila de la celda 51 a la celda 60, donde algunas celdas son significativamente más brillantes que las demás. También presenta alrededor de 39 celdas con manchas que son debido a la heterogeneidad cristalina.

En cuanto a los paneles Solartec 1 y 2 de la Figura 4.5 (e) y (f) respectivamente, visualmente parecen similares entre sí y más homogéneos que los paneles de Solarnorte. Sin embargo, un análisis más detallado revela una degradación en la intensidad electroluminiscente más pronunciada y la presencia de celdas con grietas, que podrían desarrollar más defectos con el tiempo. El panel Solartec 2, en particular, muestra a la celda 53 con una pequeña mancha oscura, posiblemente relacionada con grietas, y se percibe visualmente como más heterogéneo que el panel Solartec 1.

En este estudio de investigación, el grupo de paneles Canadian Solar se considera el de menor calidad en este estudio debido a los numerosos defectos presentados. Inicialmente, se había

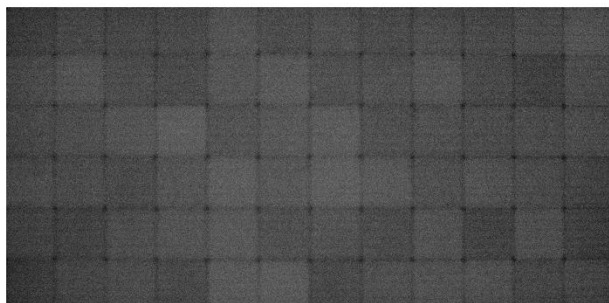
planeado medir y analizar solo los paneles Canadian Solar 1 y 2, pero se incluyeron otros dos paneles debido a la alta incidencia de defectos similares en esta marca. Todo este grupo de paneles solares, se consideran de una mala calidad de material, ya que se le tomaron imágenes de electroluminiscencia a más paneles solares de la misma marca y la mayoría resultaron con defectos similares al del Canadian solar 2.

En la Figura 4.5 (g), muestra el panel Canadian Solar 1 con numerosos defectos en las celdas solares. Alrededor de 28 celdas muestran daños graves, y otras 5 tienen grietas mínimas. Este panel presenta la mayoría de los defectos, que van desde grietas hasta lo que parecen ser babas de caracol.

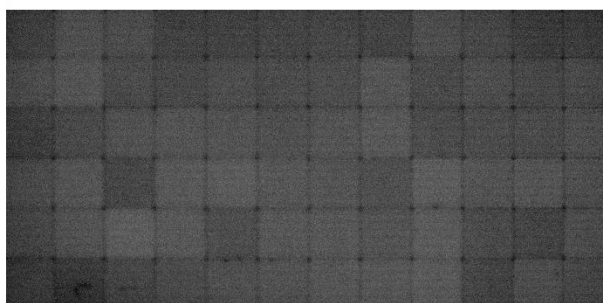
En cuanto al panel Canadian Solar 2 de la Figura 4.5 (h), visualmente presenta defectos notables en aproximadamente 9 celdas. Estos defectos incluyen grietas y roturas y una celda con la mitad de su superficie en oscuridad, posiblemente debido a daños físicos.

El panel Canadian Solar 3, a pesar de ser el más eficiente en este grupo, muestra cierta degradación en la intensidad de celdas y algunas áreas con manchas oscuras en la mayoría de las celdas del panel como se puede ver en la Figura 4.5 (i) y (j) respectivamente. Por otro lado, el panel Canadian solar 4 presenta una mayor degradación, con celdas más oscuras y defectos de heterogeneidad en una de ellas.

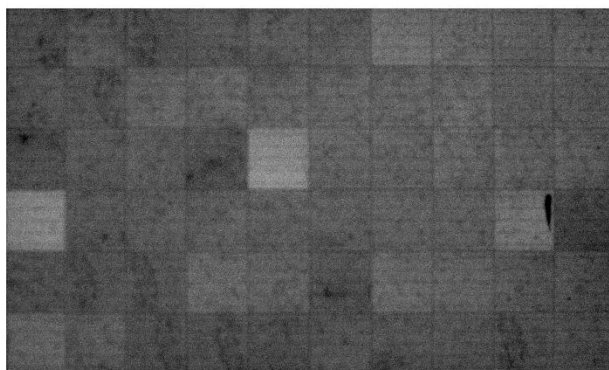
Estas observaciones visuales son fundamentales para comprender el estado de los paneles solares y cómo los posibles defectos pueden afectar su desempeño. Es importante tener en cuenta que el análisis de procesamiento de imágenes proporcionará una evaluación más detallada de la calidad de los paneles y su capacidad para generar energía de manera eficiente.



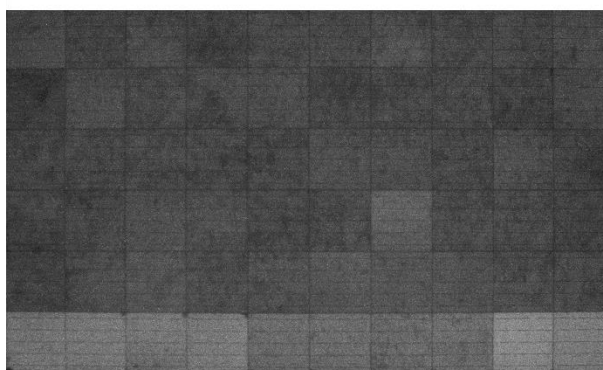
(a) Qcells 1



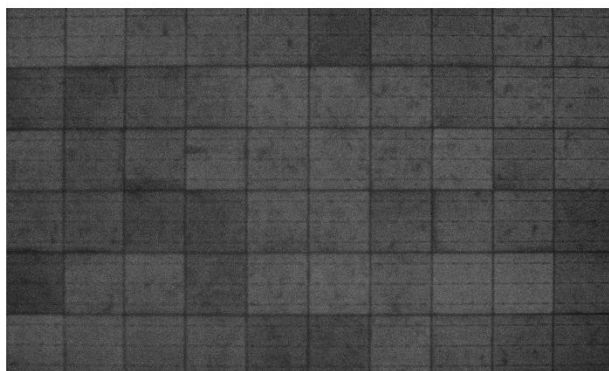
(b) Qcells 2



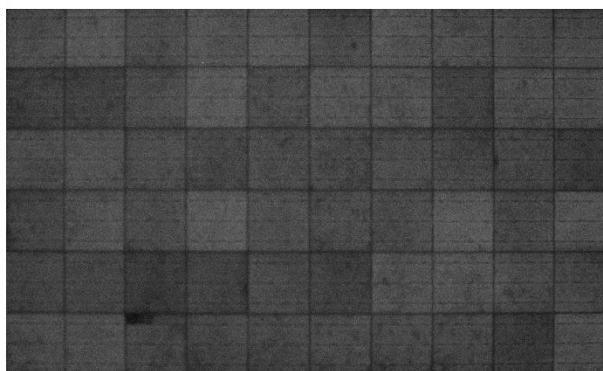
(c) Solarnorte 1



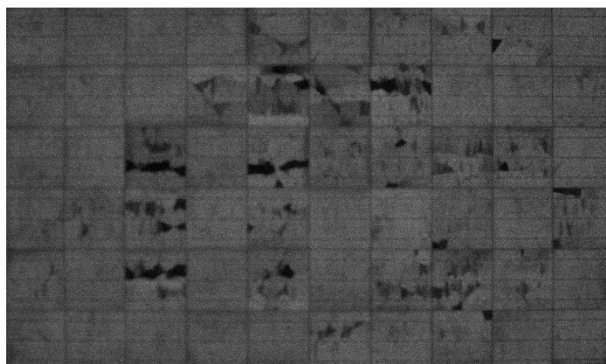
(d) Solarnorte 2



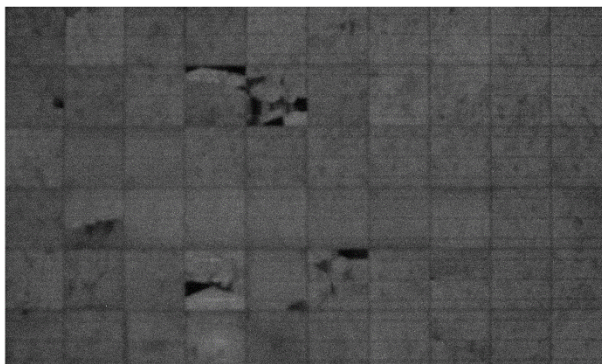
(e) Solartec 1



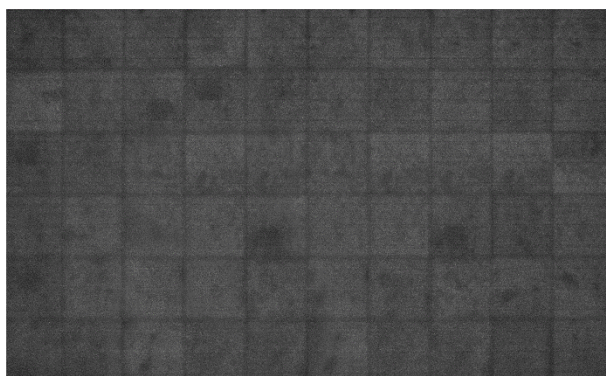
(f) Solartec 2



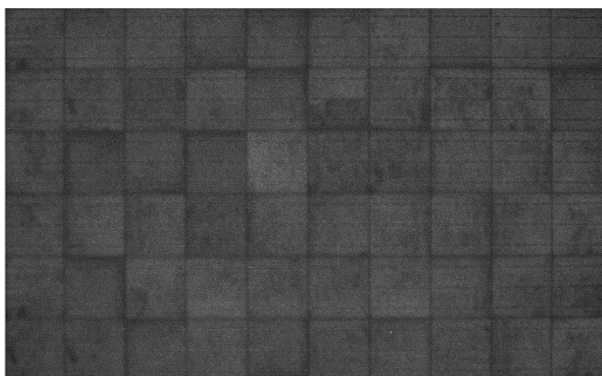
(g) Canadian solar 1



(h) Canadian solar 2



(i) Canadian solar 3



(j) Canadian solar 4

Figura 4.5. Imágenes de electroluminiscencia de los paneles solares analizados.

Para obtener los resultados que se muestran en la Figura 4.6, se realizó un análisis detallado de la intensidad de cada píxel en las imágenes de electroluminiscencia tomadas de los paneles solares, específicamente aquellas que se muestran en la Figura 4.5. Este proceso es fundamental para evaluar la calidad y la homogeneidad de la electroluminiscencia en las celdas solares, determinando al color rojo como una intensidad alta en valor de 100 y el color morado a una intensidad baja o cero.

Comenzando con el panel Qcells 1, visualmente se observan celdas con una intensidad electroluminiscente más alta que otras como se ve en la Figura 4.5 (a), y este hallazgo se confirma en la Figura 4.6 (a). En esta imagen, el aumento del color rojo indica las celdas que presentan una mayor intensidad electroluminiscente, y se identifican aproximadamente 15 celdas solares con una intensidad más alta. Por otro lado, las demás celdas se consideran similares en intensidad, a excepción de unas 5 celdas que muestran una intensidad electroluminiscente más baja, representada en color verde.

En el caso del panel Qcells 2, se observa que alrededor de 28 celdas tienen una intensidad electroluminiscente superior como se ve en la Figura 4.6 (b). Sin embargo, se aprecia una disminución en la distribución de datos en el análisis de este panel, lo que indica una mayor homogeneidad en comparación con el Qcells 1. No obstante, en la celda 52 se observa un defecto donde ya no hay intensidad electroluminiscente, lo que podría indicar un problema grave en esa celda.

En el panel Solarnorte 1, como se muestra en la Figura 4.5 (c), en el análisis de las imágenes de electroluminiscencia se identificaron 3 celdas solares con una intensidad electroluminiscente más alta que las demás y esto se confirma en la Figura 4.6 (c), donde se pueden ver dos áreas de mayor intensidad electroluminiscente, correspondientes a las celdas 25 y 31, y la celda 39 como una de las celdas de intensidad electroluminiscente alta contando con un defecto de rotura que se observa en color morado, determinando una falta de intensidad en esa parte. Además, se aprecia una zona más amplia con intensidad en color verde, lo que indica que varias celdas tienen una mayor intensidad, y se utiliza el color azul para resaltar las celdas con manchas o grietas pequeñas. En este caso, la celda 39 muestra una grieta de un tamaño que aún no afecta significativamente la corriente.

En cuanto al panel Solarnorte 2, se evidencia una gran diferencia en la intensidad electroluminiscente, como se puede apreciar en la Figura 4.6 (d). Esto confirma que las celdas de la fila 51 a la 60 tienen una intensidad electroluminiscente significativamente mayor que las demás celdas solares.

En el análisis de la intensidad electroluminiscente de los paneles Solartec 1 y Solartec 2 de la Figura 4.6 (e) y (f) respectivamente, se observa que ambos paneles tienen intensidades electroluminiscentes similares. Sin embargo, el panel Solartec 1 se destaca por tener más celdas

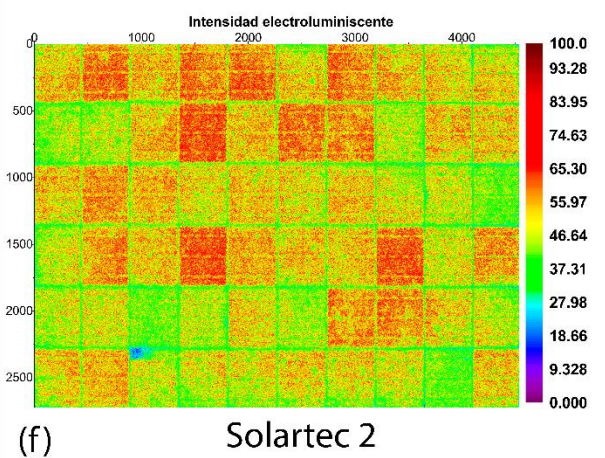
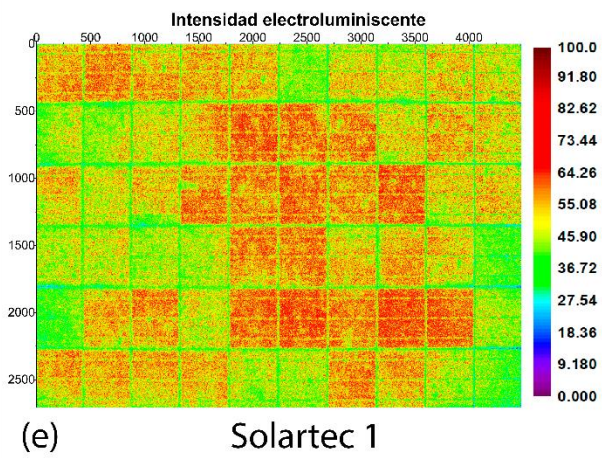
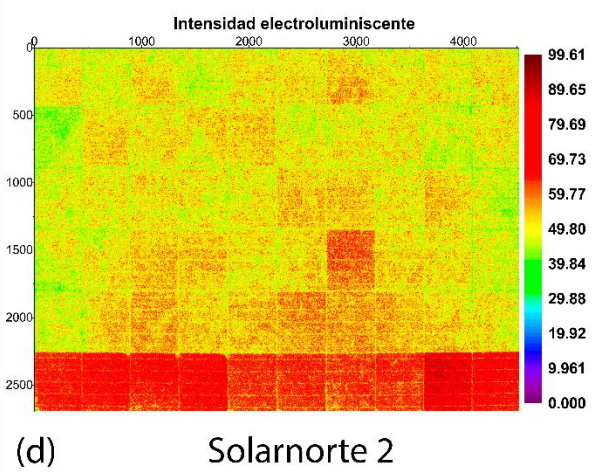
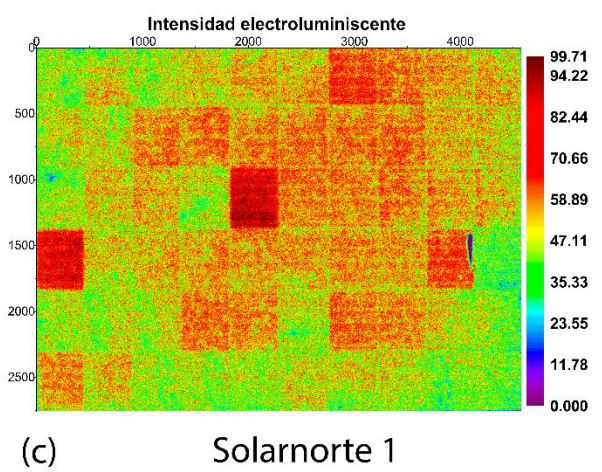
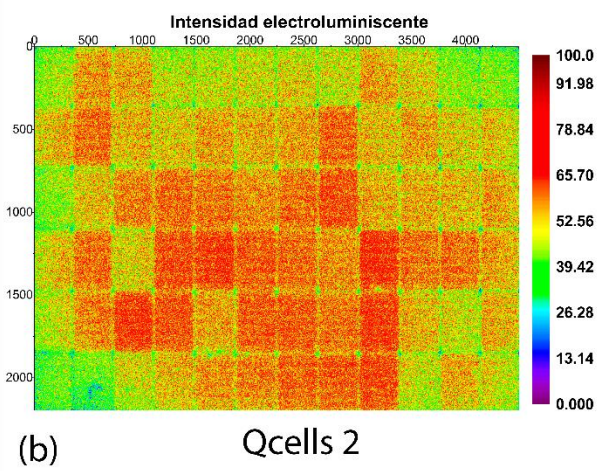
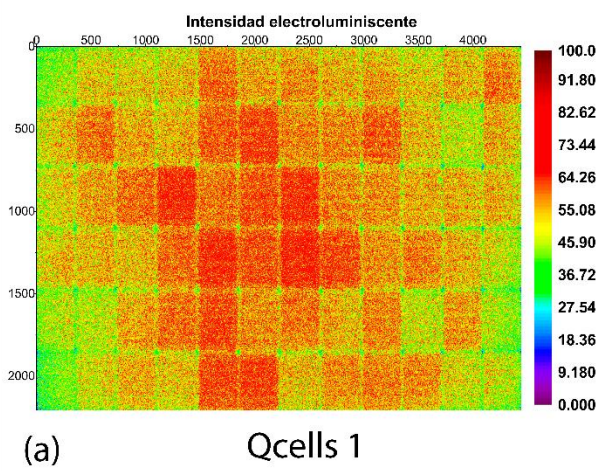
solares con una mayor intensidad electroluminiscente, aproximadamente alrededor de 30 celdas más brillantes que se observan en la Figura 4.6 (e)), A pesar de esta diferencia, se pueden identificar 5 celdas con una distribución de intensidad más baja en el panel Solartec 1, lo que resulta en diferentes niveles de brillo en las celdas, como se observa en la Figura 4.5 (e). Por otro lado, el panel Solartec 2 muestra 14 celdas solares con una mayor intensidad electroluminiscente, como se puede apreciar en la Figura 4.6 (g). Sin embargo, este panel también contiene una cantidad significativa de celdas con una intensidad más baja en comparación con el panel Solartec 1.

En cuanto al panel Canadian solar 1, en la Figura 4.6 (g) se observan secciones en las que algunas celdas ya no presentan intensidad electroluminiscente, se destacan en color rojo las celdas que no presentan defectos significativos en la imagen de electroluminiscencia. Además, se puede notar una mayor fluctuación en los datos, lo que sugiere que estos paneles pueden ser menos eficientes debido a los daños, como se muestra en sus curvas características I-V en la Figura 4.4 (g), pues se consideran a las celdas 15, 17, 23, 25, 53 y 55 las que tienen más defectos.

En el panel Canadian solar 2, como se muestra en la Figura 4.6 (h), la intensidad electroluminiscente muestra secciones donde algunas celdas solares tienen una mayor intensidad que otras, con alrededor de 21 celdas solares más brillantes. Sin embargo, las demás celdas solares presentan una intensidad electroluminiscente menor debido a los defectos, como se puede ver en las celdas 14, 15, 44 y 46, que muestran daños significativos.

Por último, el panel Canadian Solar 3 presenta una mayor cantidad de celdas con mayor intensidad, alrededor de 32 celdas solares con mayor intensidad. En cambio, el panel Canadian Solar 4 solo muestra ciertas celdas solares más brillantes que otras, alrededor de 5 celdas, y las demás celdas presentan una homogeneidad en intensidad entre ellas. Esta diferencia se puede observar en la Figura 4.6 (i) y (j) respectivamente, donde el panel Canadian Solar 4 no muestra un contraste tan marcado como los otros dos paneles de la misma marca.

Este análisis de procesamiento de imágenes es esencial para comprender en detalle la distribución de la intensidad en las celdas solares y cómo los posibles defectos afectan la homogeneidad y la calidad de los paneles solares. Estos resultados proporcionan información valiosa sobre el rendimiento y la eficiencia de los paneles en condiciones reales.



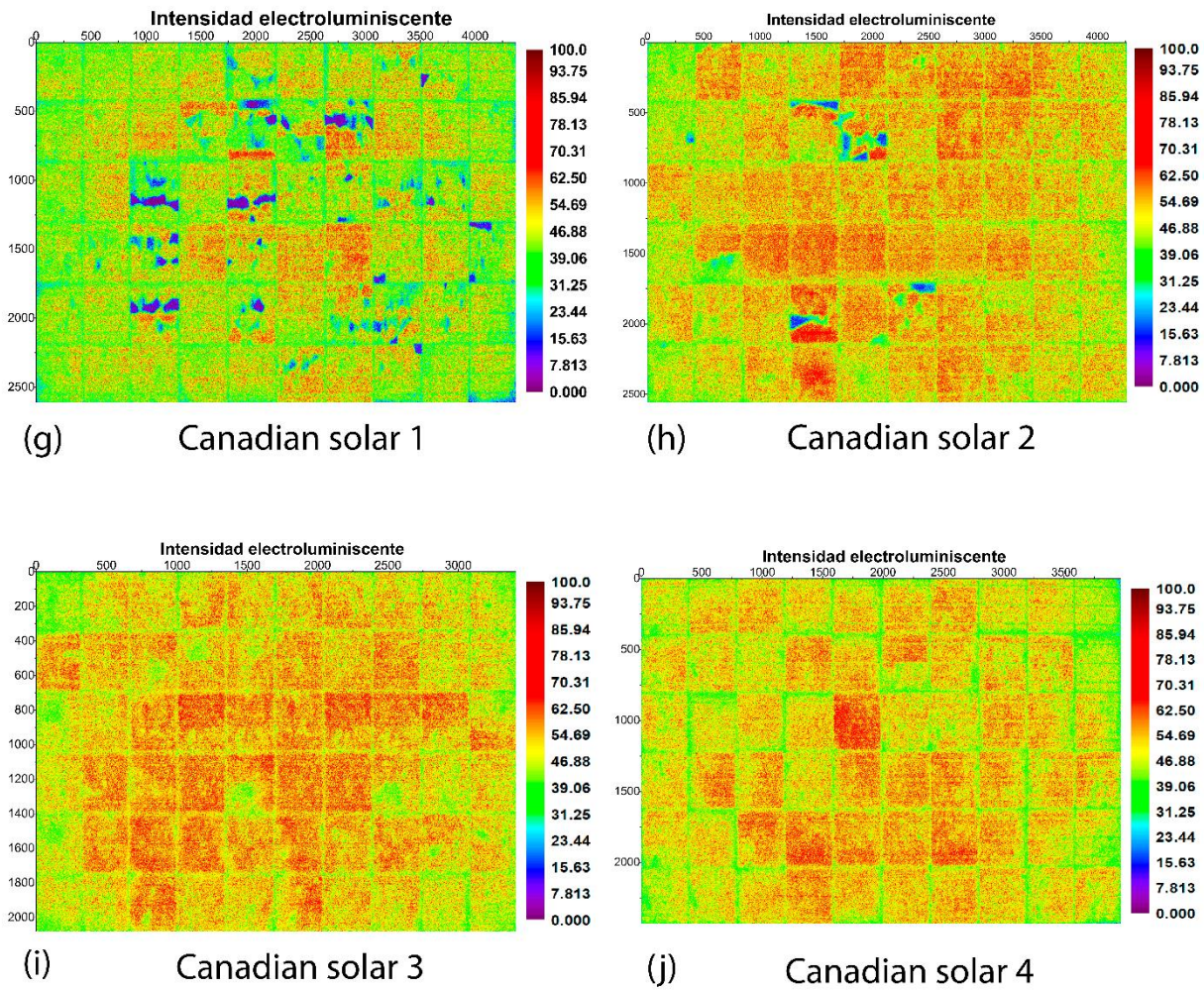


Figura 4.6. Análisis de la intensidad electroluminiscente de los paneles solares analizados.

Debido a la fila de celdas con una mayor intensidad electroluminiscente presentada en el panel Solarnorte 2, surge la posibilidad de llevar a cabo el análisis del panel excluyendo esta fila de celdas más brillantes. No obstante, si se decide no considerar esta fila en el análisis, se observa que el panel en su conjunto exhibe una mayor homogeneidad en cuanto a la intensidad electroluminiscente en las celdas, como se puede apreciar en la Figura 4.7.

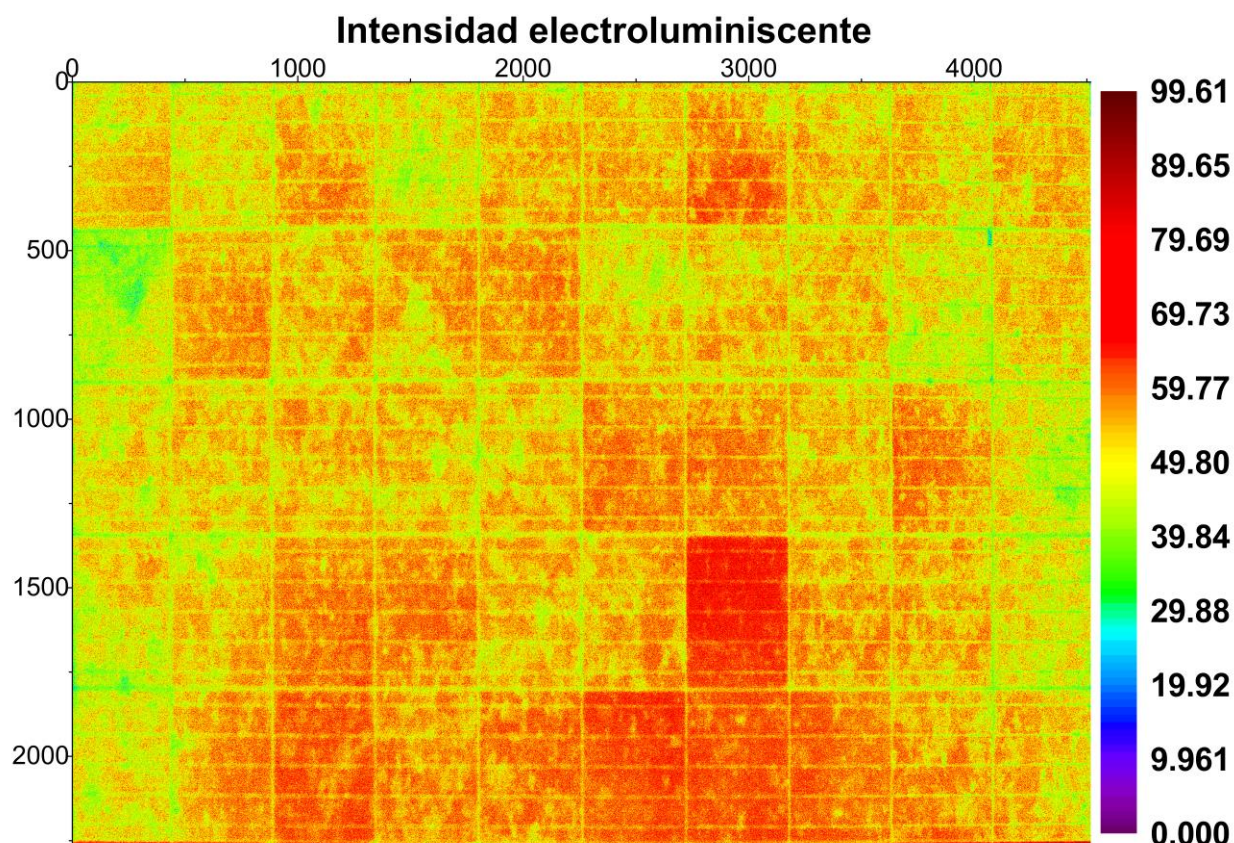


Figura 4.7. Análisis de la intensidad electroluminiscente del panel Solarnorte 2 sin considerar la fila de celdas con mayor intensidad.

Después de realizar el análisis de la intensidad electroluminiscente, se procede a examinar la desviación estándar (ΔI) de la intensidad en cada panel solar, lo que nos permite determinar el coeficiente de variación ($\Delta I/I$) mostrado en la Figura 4.9. Este coeficiente de variación es una métrica fundamental que nos ayuda a evaluar la homogeneidad o heterogeneidad de las celdas dentro de cada panel solar, determinando al color rojo como 1 o el panel más heterogéneo y cero o al color morado como más homogéneo, esperando que en el análisis los paneles se pinten de un color morado o cercano a la tendencia de valores en azul.

Comenzando con el análisis del panel Qcells 1, se observa una tendencia de variación mínima, ya que los valores de los coeficientes de variación son bastante similares en la mayoría de las celdas solares, como se aprecia en la Figura 4.9 (a). Se observa que presenta una variación mínima, ya que los valores de los coeficientes de variación son bastante similares en la mayoría de las

celdas solares. Esto sugiere que el panel solar Qcells 1 es en su mayoría homogéneo, lo que respalda la idea de que la pérdida de eficiencia es mínima, incluso en condiciones de alta temperatura.

En cuanto al panel solar Qcells 2, su comportamiento es similar al del Qcells 1. Sin embargo, al observar el coeficiente de variación en la Figura 4.9 (b) se nota que el panel muestra una homogeneidad ligeramente mayor en comparación con el Qcells 1. Esto indica que una parte significativa de las celdas es homogénea, lo que podría resultar en una eficiencia similar o incluso mayor que la del Qcells 1.

Por otro lado, en el panel Solarnorte 1 se observa que el coeficiente de variación refleja una alta homogeneidad como se muestra en la Figura 4.9 (c), aunque en color verde se determinan ciertos daños que tiene la celda, que pueden ser producidos por la falta de homogeneidad cristalina, y viendo la imagen de electroluminiscencia se llega a la conclusión de que las áreas verdes del análisis de homogeneidad si es debido a este defecto de la calidad de la celda, y presentando una mayor homogeneidad en las celdas más iluminadas que se identifican como celda 25, 31 y 39, aunque esta última sigue presentando una heterogeneidad por el defecto de rotura que tiene.

Por otro lado, en el panel Solarnorte 2, la fila de celdas de la 51 a la 60 se muestran con mayor intensidad electroluminiscente exhibe una alta homogeneidad, mientras que las demás celdas presentan una heterogeneidad notable debido a la intensidad de la fila mencionada anteriormente, pero homogéneas entre las celdas de la 1 a la 50, aunque presenta la heterogeneidad cristalina debido a la calidad del material. Para poder observar detalladamente este conjunto de 50 celdas, se considera excluir a la fila de celdas de la 51 a 60 con mayor cantidad de intensidad electroluminiscente, obteniendo que el panel es considerablemente homogéneo (ver Figura 4.8), esta observación sugiere que, de no ser por la fila de celdas con mayor intensidad, el panel solar Solarnorte 2 sería de buena calidad, ya que el valor del coeficiente de variación es más bajo en comparación con el panel completo, lo que resultaría en una mejor homogeneidad en la distribución de intensidades.

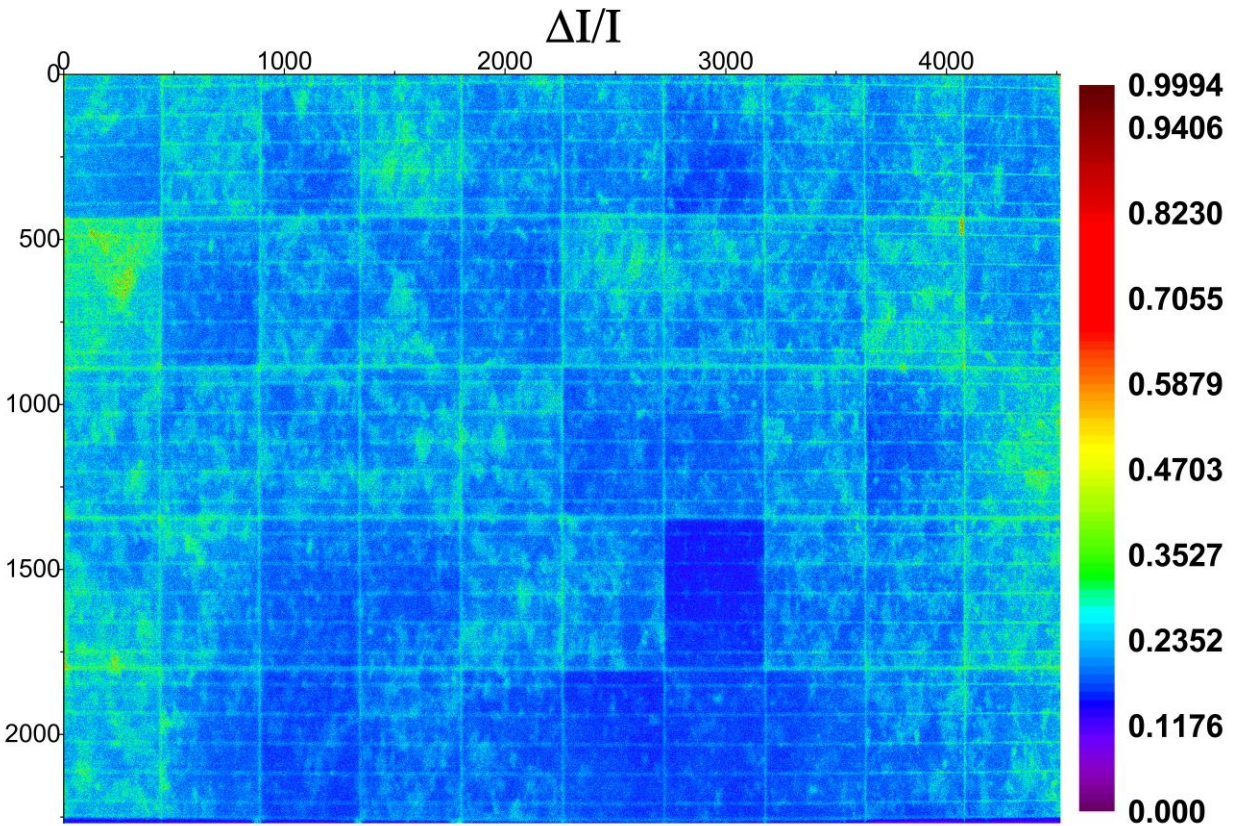


Figura 4.8. Análisis del coeficiente de variación del panel Solarnorte 2 sin considerar la fila de celdas con mayor intensidad electroluminiscente.

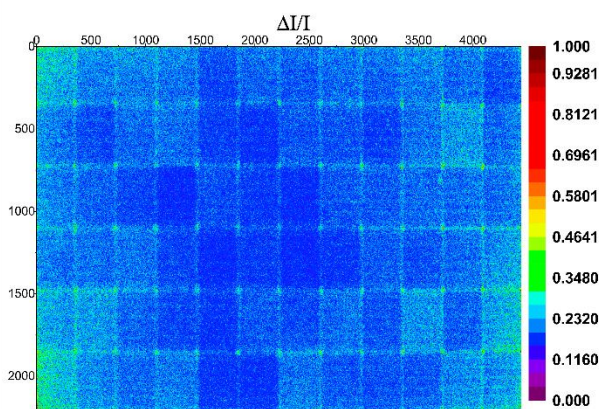
En cuanto al análisis del coeficiente de variación, podemos observar diferencias significativas entre los paneles Solartec 1 y Solartec 2. Aunque a simple vista el Solartec 2 podría parecer más homogéneo, al analizar los valores del coeficiente de variación en la Figura 4.9 (e) y (f), se evidencia que el Solartec 1 es en realidad más homogéneo. Esto se debe a que los valores de variación son más bajos en el Solartec 1 en comparación con el Solartec 2. Un valor de coeficiente de variación más bajo indica una mayor homogeneidad, y en este caso, el Solartec 1 tiene 42 celdas que son notoriamente homogéneas, aunque en ambos paneles se determina la heterogeneidad cristalina de cada celda solar, y el defecto de rotura del panel Solartec 2 en la celda 52.

Pasando a los paneles Canadian Solar, el análisis del coeficiente de variación revela diferencias sustanciales entre ellos. Para el panel Canadian solar 1, en la Figura 4.9 (g) se muestra que la mayor parte del panel solar está dañado, esto confirma visualmente la presencia de daños en la mayoría del panel solar, lo que resulta en una eficiencia más baja del 9.49%. Además, el coeficiente de variación se acerca a 1 en su mayoría, lo que indica una alta heterogeneidad en el panel.

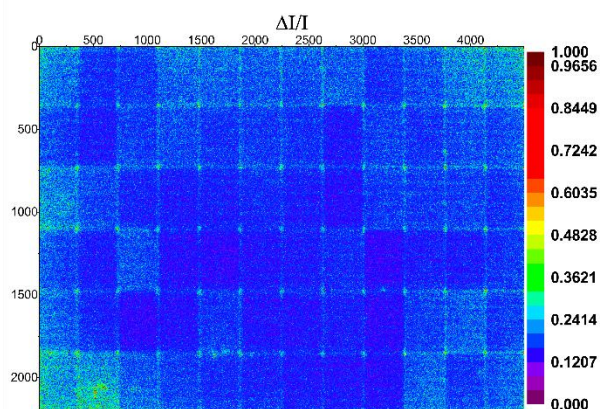
En cambio, el Canadian Solar 2, aunque presenta menos daños en las celdas 14, 15, 44 y 46, todavía muestra cierta variación en la intensidad, como se observa en la Figura 4.9 (h) Sin embargo, en este caso, los valores tienden a acercarse a cero, lo que indica una menor fluctuación de datos en comparación con el Canadian Solar 1.

Para los paneles Canadian Solar 3 y Canadian Solar 4, ambos exhiben una homogeneidad similar. Sin embargo, al examinar detenidamente los valores del coeficiente de variación en la Figura 4.9 (i) y (j) respectivamente, se nota que el Canadian Solar 3 presenta valores de variación ligeramente más bajos en comparación con el Canadian Solar 4. Esto indica una mayor homogeneidad en el Canadian Solar 3 en comparación con el Canadian Solar 4. Aunque ambos paneles pueden considerarse homogéneos en general, el Canadian Solar 3 se destaca como el más eficiente dentro de este lote.

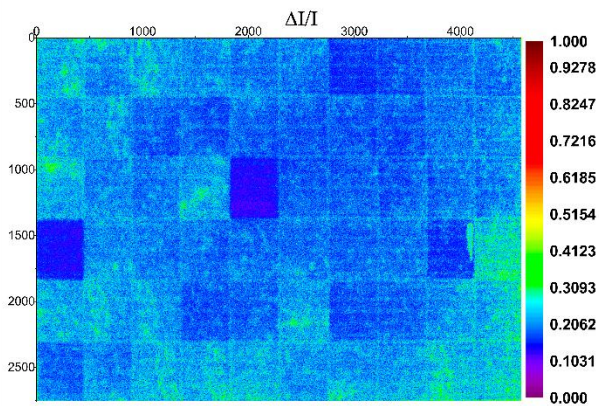
Es importante destacar que ninguno de los cuatro paneles Canadian Solar alcanza la eficiencia que el fabricante menciona a condiciones STC, que sería de alrededor del 14.61%. Todos los paneles presentan eficiencias por debajo del 11% , considerando que el panel más bajo de eficiencia tiene una pérdida de 5.12% y el panel más alto de eficiencia con una pérdida de 4.22%. Esto representa una pérdida significativa de eficiencia en todos los casos, con el Canadian Solar 3 siendo el más eficiente dentro de este grupo, seguido por el Canadian Solar 4, luego el Canadian Solar 2 y, finalmente, el Canadian Solar 1, que muestra la eficiencia más baja de todos los paneles analizados.



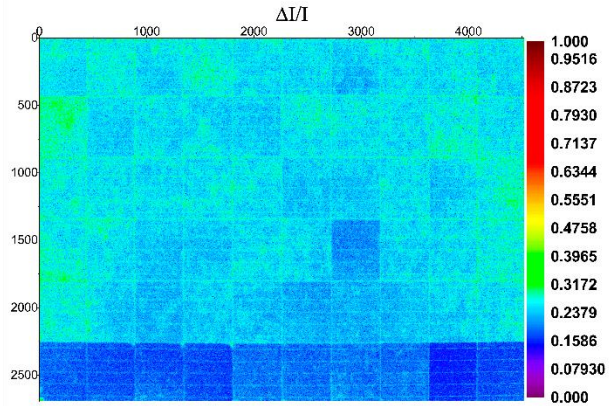
(a) Qcells 1



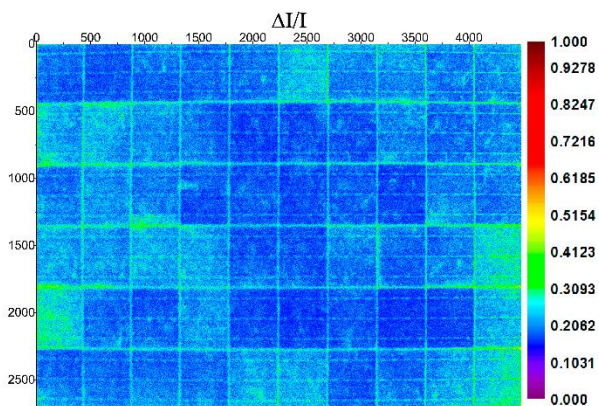
(b) Qcells 2



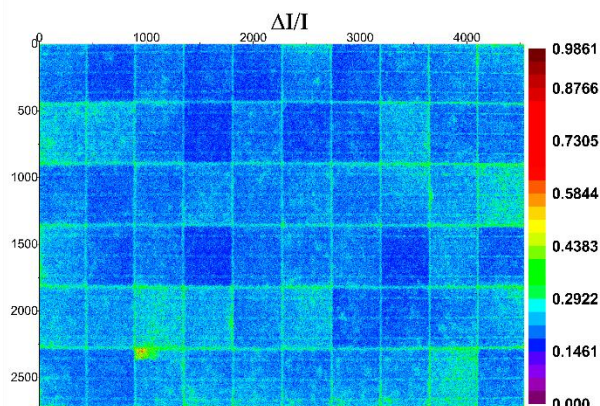
(c) Solarnorte 1



(d) Solarnorte 2



(e) Solartec 1



(f) Solartec 2

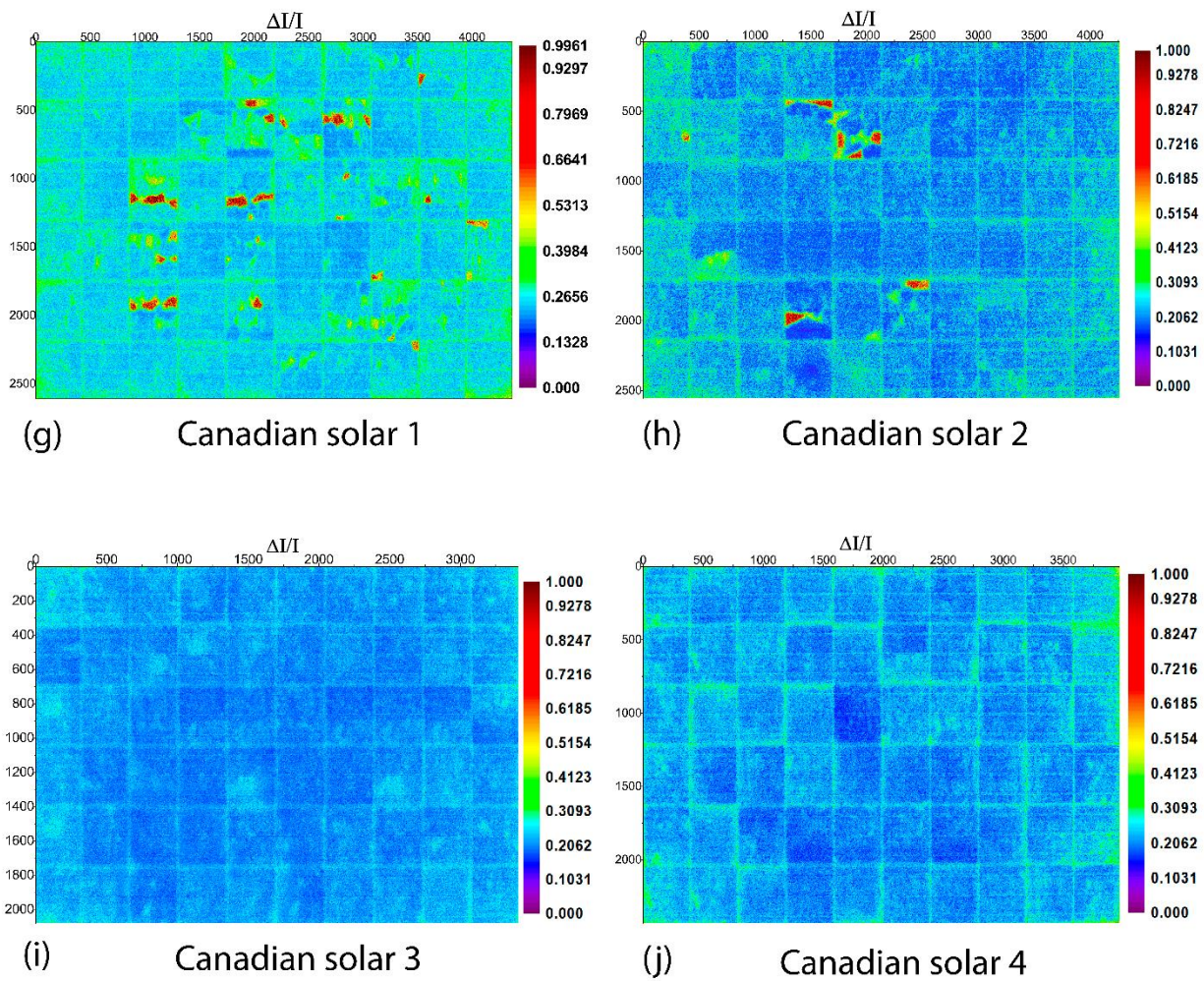


Figura 4.9. Análisis de la homogeneidad con el coeficiente de variación ($\Delta I/I$) de los distintos paneles solares.

Capítulo 5

Estudio comparativo de la eficiencia de conversión de paneles fotovoltaicos comerciales

La combinación del procesamiento de imágenes de electroluminiscencia junto con el análisis de las curvas I-V se convierte en una herramienta altamente efectiva para evaluar de manera exhaustiva la calidad y eficiencia de los paneles solares. Mientras que la electroluminiscencia nos brinda un escaneo interno que detecta minuciosamente cualquier posible fallo en la estructura de las celdas o paneles solares, las curvas I-V nos proporcionan un enfoque cuantitativo que nos ayuda a comprender cómo estos fallos afectan el rendimiento eléctrico real de los paneles solares. Es esencial resaltar que, además de la calidad y eficiencia, el costo de los paneles solares juega un papel crítico en el campo de la energía solar fotovoltaica. Este factor es determinante para el éxito y la viabilidad económica de la energía solar como una fuente de energía sostenible y limpia. Tanto en el ámbito residencial como en el industrial, el costo de los paneles solares puede ofrecer ventajas económicas sustanciales. Sin embargo, es de vital importancia llevar a cabo un análisis financiero integral que contemple diversos elementos antes de tomar la decisión de invertir en paneles solares. Estos elementos pueden incluir el costo inicial de adquisición e instalación, los posibles ahorros a lo largo del tiempo, los incentivos gubernamentales y las tarifas de la red eléctrica, entre otros. Este enfoque financiero informado resulta esencial para evaluar la rentabilidad y el impacto a largo plazo de la inversión en energía solar.

Los paneles solares que se han sometido a análisis fueron adquiridos en los últimos once años, reflejando que, hasta la fecha actual, ha habido avances significativos tanto en la calidad como en el costo de los paneles solares. La Tabla 5.1 presenta información sobre el año de compra y el costo de adquisición en dólares estadounidenses de los paneles solares que son objeto de estudio en esta investigación, considerando los costos sin impuestos.

Panel solar	Fecha de compra	Costo (\$ USD)	Costo por Watt (\$ USD)
Qcells Q.Peak L-G5 370	09/07/2019	\$208.94	\$0.56
Solarnorte 265-60P	07/11/2017	\$116.60	\$0.44
Solartec S60PC-250	31/10/2013	\$326.92	\$1.30
Canadian Solar CS6P-235PX	26/01/2012	\$310.98	\$1.32

Tabla 5.1. Costo y fecha de compra de los paneles solares comerciales analizados.

Sin embargo, para realizar una comparación precisa del costo en términos de precio por watt en cada año de compra, es esencial realizar un ajuste al año 2019. Esto permitirá una mejor comparación del costo de cada panel solar con respecto a cuánto valdría aproximadamente el vatio en el año 2019. Este ajuste se realiza mediante la ecuación (5.1) específica para cada panel solar, en donde el *Costo del watt_{al 2019}* es el costo del panel policristalino presentado por la Agencia Internacional de Energía (IEA), el *Costo del watt_{al año de compra}* es el costo del watt según IEA al año que se compraron los paneles que se presentan en la Tabla 5.2, y el *Costo del watt_{comprado}* es el costo del watt por el que se compró cada panel solar mostrado en la Tabla 5.1. El costo ajustado al 2019 se presentan en la Tabla 5.3.

$$\text{Costo del watt}_{al\ 2019} = \frac{\text{Costo del watt}_{al\ 2019}}{\text{Costo del watt}_{al\ año\ de\ compra}} * \text{Costo del watt}_{comprado} \quad (5.1)$$

Tipo de panel	Año	Costo del watt dados por IEA [\$ USD]
Policristalino	2012	0.9
Policristalino	2013	0.8
Policristalino	2017	0.5
Policristalino	2019	0.2
Monocristalino	2019	0.3

Tabla 5.2. Costo del watt en cada año de compra según la Agencia Internacional de Energía (IEA).

[9]

Tipo de panel	Costo del watt ajustados [\$ USD]
Canadian Solar	0.29
Solartec	0.32
Solarnorte	0.17
Qcells	0.56

Tabla 5.3. Costo por watt de cada panel solar ajustado al 2019 por los datos de IEA.

Dando como resultado una variación significativa en los costos de los paneles solares monocristalinos de la marca Qcells en comparación con los paneles policristalinos de la marca Solarnorte como los más económicos de este estudio. La Tabla 5.3 indica que los paneles Qcells tenían un costo aproximadamente el doble de lo que costaría en términos de costo por watt en su año de compra que fue de \$0.3 dólares.

Finalmente, se realiza el análisis del costo del watt que en realidad está generando cada panel solar en este estudio, determinando así un aumento en el costo real por watt, con un incremento promedio de \$0.1 USD como se muestra en la Figura 5.1. Sin embargo, se observa una excepción en el caso de los paneles Solarnorte, donde se presenta un incremento más significativo de \$0.5 USD por watt en comparación con el costo ajustado. Esto sugiere que, aunque los costos iniciales de los paneles Solarnorte eran relativamente bajos, el costo real de generación de energía a través de estos paneles ha aumentado considerablemente con el tiempo por su pérdida de eficiencia.

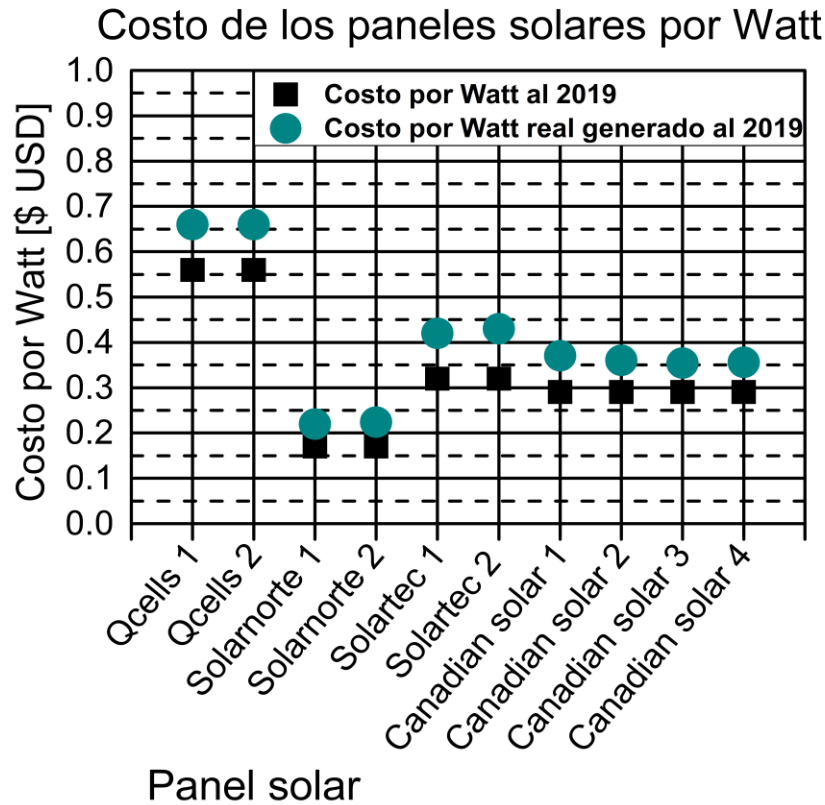


Figura 5.1. Costo del watt ajustado de cada panel solar en comparación con el costo real que cuesta cada watt generado en este análisis.

En resumen. Al considerar el análisis de este trabajo de investigación y el costo de los paneles, con la ayuda de la Figura 5.1 que representa el costo del watt de cada panel, la Figura 5.2 que muestra en comportamiento de la eficiencia referente a la homogeneidad, la Tabla 5.1 y la Tabla 5.3, junto al análisis presentado en el Capítulo 4, se observa que el panel Qcells 2 es el mejor panel solar de los diez paneles solares seguido del panel Qcells 1 considerando que es monocristalino, se espera que sea mucho más eficiente que los policristalinos y teniendo una mayor conversión de potencia eléctrica, ambos paneles tienen un costo por watt de \$0.56 dólares pero realmente el costo real por lo que genera es de \$0.66 dólares.

En la categoría de paneles policristalinos, la marca Solarnorte se posiciona en el primer lugar debido a su eficiencia y homogeneidad, además de su asequible costo de \$0.22 dólares por vatio generado (ajustado al año 2019). En particular, los paneles Solarnorte 1 y 2 se consideran buenas opciones en este estudio.

Por último, los paneles de la marca Canadian Solar ocupan el último lugar debido a su bajo rendimiento y costos más elevados de \$1.32 dólares por watt adquirido, y en promedio el costo del watt generado de esta marca ronda en \$0.36 dólares. Aunque los paneles Solartec presentan un costo por vatio superior, generan más potencia, pero aun así su costo de watt generado está en \$0.42 dólares, considerado una mala opción.

En general, en la Figura 5.2 se observa una pequeña tendencia en la que la eficiencia disminuye a medida que aumenta el coeficiente de variación. Estos hallazgos son fundamentales para tomar decisiones informadas sobre la elección de paneles solares en función de la eficiencia y el costo.

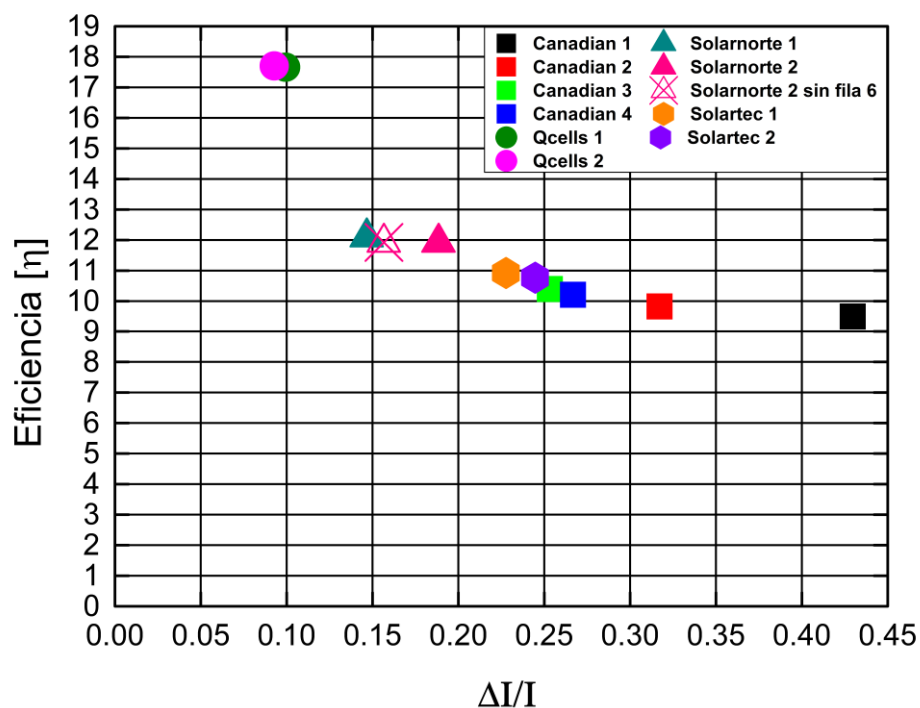


Figura 5.2. Correlación de la eficiencia de los paneles solares con referencia a $(\Delta I/I)$.

Capítulo 6

Conclusiones

La curva I-V proporciona una representación detallada de la relación entre la corriente y el voltaje en diversas condiciones de funcionamiento, lo que le permite identificar posibles problemas en el funcionamiento eléctrico del panel. Por otro lado, la electroluminiscencia ofrece una representación visual que revela detalles sobre posibles fallos internos y la variabilidad en la estructura de las celdas o los paneles solares. Estas herramientas proporcionan un análisis exhaustivo del estado y el rendimiento de los paneles solares. La combinación de estas técnicas es fundamental para evaluar la calidad de los materiales utilizados, proporcionan un análisis exhaustivo del estado y el rendimiento de los paneles solares, lo que incluye la identificación de áreas de bajo rendimiento, signos de degradación y otros aspectos que influyen en la eficiencia de los paneles. Este análisis también es de gran relevancia en el ámbito industrial, especialmente al considerar la instalación de sistemas solares fotovoltaicos a gran escala. Conocer el estado de los paneles solares adquiridos es esencial, y el análisis de imágenes de electroluminiscencia puede proporcionar información valiosa para tomar decisiones de inversión informadas.

Concluyendo con el objetivo de este trabajo culminado con éxito, se desarrolló un predictor basado en la captura de imágenes de electroluminiscencia en relación con la utilización de la estación de pruebas para determinar su eficiencia. Pero, debido a que el desarrollar la estación de pruebas implica ciertas complicaciones, se plantea el objetivo específico (b), concluyendo con éxito. Determinando así que, con solo tomar imágenes de electroluminiscencia, se puede evaluar que tan buena calidad es el material con el cual están fabricados, y encontrar cuál de todo el conjunto de paneles analizados será el más eficiente.

Los hallazgos de este estudio sugieren que, en términos de eficiencia y costo, la adquisición de paneles solares monocristalinos puede ser recomendable. Sin embargo, para aquellos con

restricciones presupuestarias, la marca Solarnorte es una opción atractiva debido a su mayor eficiencia y menor costo por watt en comparación con otras marcas de paneles solares policristalinos, aunque, es importante tener en cuenta las condiciones específicas de instalación, los objetivos y los recursos disponibles al seleccionar un panel solar adecuado para cada proyecto.

Dado que en la actualidad existen paneles solares más eficientes y de mejor calidad, así como opciones más competitivas en cuanto a costos, sería interesante ampliar este estudio para incluir un análisis de mercado actual más completo en el campo de la energía solar fotovoltaica.

Apéndice A

Calibración del piranómetro CMP 3

Debido al tiempo de adquisición y al tiempo de uso del piranómetro CMP 3 se plantea volver a calibrar, ya que estos piranómetros se tienen que calibrar cada 2 años. El piranómetro CMP 3 de la compañía Kipp&Zone se recalibró contra el piranómetro CMP 11 de la misma compañía, siendo más nuevo y teniendo un menor tiempo de uso.

Especificaciones del piranómetro CMP 3:

Rango espectral total	300 a 2800 nm
Tiempo de respuesta	20 segundos
Sensibilidad	10.63 μ V/Wm ²
Detector	Termopila de unión múltiple de cobre-Constantán
Rango de temperatura de operación	-40 °C a +80 °C
Campo de visión	180°

Tabla A.1. Especificaciones y características del piranómetro CMP 3.

Especificaciones del piranómetro CMP 11:

Rango espectral total	285 a 2800 nm
Tiempo de respuesta	<5 segundos
Sensibilidad	8.42 μ V/Wm ²
Detector	Termopila de unión múltiple de cobre-Constantán
Rango de temperatura de operación	-40 °C a +80 °C
Campo de visión	180°

Tabla A.2. Especificaciones y características del piranómetro CMP 11.



Figura A.1. Piranómetros nivelados para la toma de muestras.

Para esta recalibración se posicionan los dos piranómetros nivelados uno a lado del otro en la azotea del IICO para generar la misma irradiancia como se muestra en la Figura A.1 y se considera un rango de horas entre las 8:42 a.m. a las 2:42 p.m. del día 23 de abril del 2023, siendo un día parcialmente soleado. Se toma la muestra con un multímetro con escala de mV debido a su escala de salida de voltaje de cada uno como se pueden observar en la tabla 1. después de las mediciones, los datos se vacían en una hoja de MS Excel donde se calcula su factor de calibración con la fórmula (A.1) y se promedian todos los valores obtenidos:

$$\overline{factor} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n \frac{Radiación\ solar_{CMP11}}{Radiación\ solar_{CMP3}} \quad (A.1)$$

Donde n es el número de muestras tomadas del piranómetro.

Para la obtención de los valores de la radiación solar se utilizan las fórmulas (A.2) y (A.3):

$$Radiación\ solar_{CMP3} = \frac{V_{salida}}{Sensibilidad} = \frac{V_{salida} [mV]}{10.63 \mu V/Wm^2} \quad (A.2)$$

$$Radiación\ solar_{CMP11} = \frac{V_{salida}}{Sensibilidad} = \frac{V_{salida} [mV]}{8.42 \mu V/Wm^2} \quad (A.3)$$

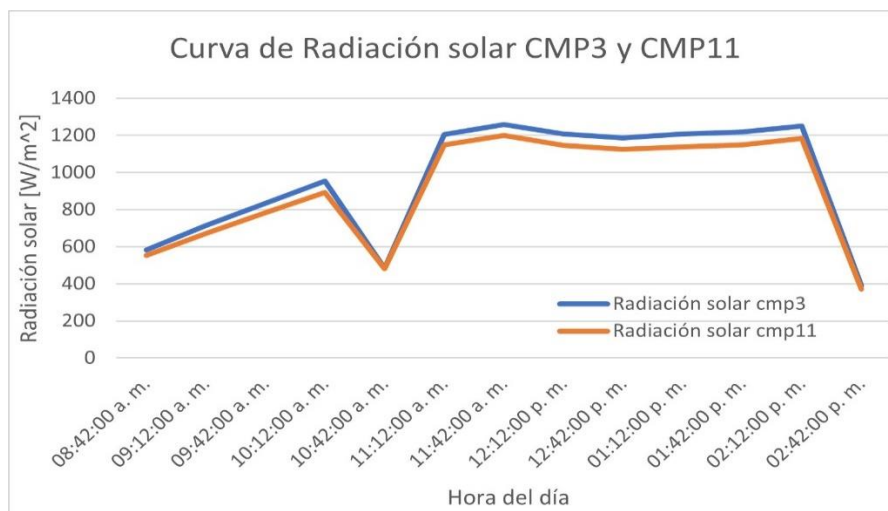


Figura A.2. Curva de radiación solar de los piranómetros CMP 3 y CMP 11 sin calibración.

En la Figura A.2 se muestra la irradiancia medida por cada piranómetro según la ecuación correspondiente, esto demuestra que el piranómetro CMP 3 estuvo descalibrado. La relación de los valores utilizando la ecuación nos da un factor promedio de 0.9489. Utilizando la ecuación (A.4) se calibra el piranómetro CMP 3 respecto al CMP 11 y mostrando los piranómetros calibrados en la Figura A.3.

$$Radiación\ solar_{CMP3} = \frac{V_{salida\ mV} * \overline{Factor}}{10.63\mu V/Wm^2} \quad (A.4)$$

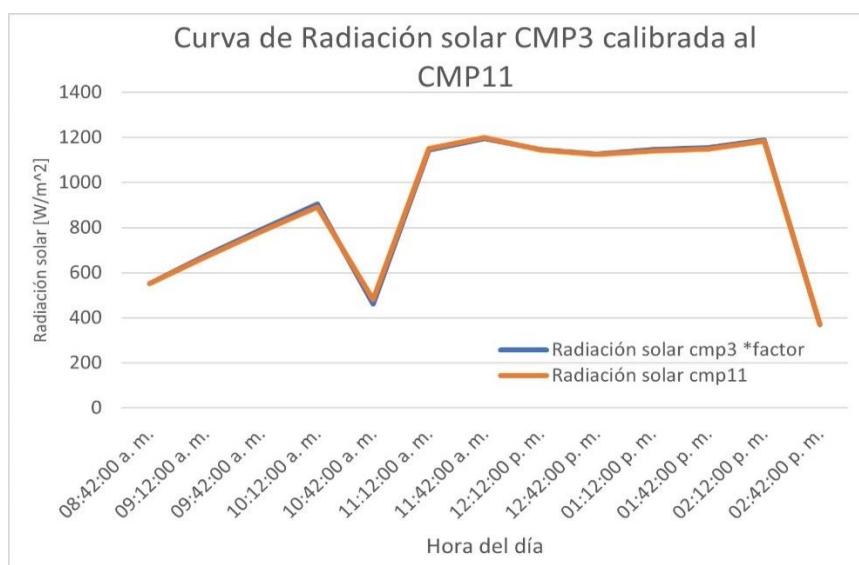


Figura A.3. Curva de radiación solar del piranómetro CMP 3 calibrada respecto al piranómetro CMP 11.

Demostando una buena calibración matemática por medio del factor promediado de la relación de la ecuación (A.1) y mostrando sus datos en la Tabla A.3.

Hora	Salida CMP3 [mV]	Salida CMP11 [mV]	Radiación solar CMP3 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Radiación solar CMP11 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Relación $\frac{Irradiancia_{CMP11}}{Irradiancia_{CMP3}}$	Radiación solar CMP3 calibrada $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
8:42 a.m.	0.00619	0.00465	582.314	552.25653	0.94838	552.59441
9:12 a.m.	0.00757	0.00564	712.135	669.83373	0.94060	675.78994
9:42 a.m.	0.00887	0.00658	834.430	781.47268	0.93653	791.84369
10:12 a.m.	0.01013	0.00751	952.963	891.92399	0.93595	904.32656
10:42 a.m.	0.00515	0.00404	484.477	479.80998	0.99037	459.75141
11:12 a.m.	0.01282	0.00968	1206.020	1149.64371	0.95325	1144.46856
11:42 a.m.	0.01339	0.01009	1259.642	1198.33729	0.95133	1195.35366
12:12 p.m.	0.01284	0.00964	1207.902	1144.89311	0.94784	1146.25400
12:42 p.m.	0.01262	0.00947	1187.206	1124.70309	0.94735	1126.61413
13:12 p.m.	0.01284	0.00959	1207.902	1138.95487	0.94292	1146.25400
13:42 p.m.	0.01294	0.00967	1217.309	1148.45606	0.94344	1155.18121
14:12 p.m.	0.0133	0.00997	1251.175	1184.08551	0.94638	1187.31917
14:42 p.m.	0.00415	0.00313	390.404	371.73397	0.95218	370.47929

Tabla A.3. Valores obtenidos de los piranómetros CMP3 y CMP 11 con su respectiva radiación solar y calibración.

Apéndice B

Código del modelado matemático para las curvas I-V

A continuación, se presenta una parte del código realizado en MATLAB del modelado matemático para las curvas I-V completo con el análisis del procesamiento de imágenes.

%% Método para determinar el valor de la corriente por Newton Raphson

%% Método de Newton Raphson

I = zeros(size(Vc));%Iniciación del vector de corriente

for j=1:10;

I = I - (IL - I - Io.*(exp((Vc+I.*Rs)./Vt) -1)-(Vc+I.*Rs)./Rsh)./(-1 - (Io.*(exp((Vc+I.*Rs)./Vt) - 1)).*Rs./Vt-(Rs/Rsh));

end

%% Grafica del banco contra el modelado

figure(1)

title('Curva I-V y P-V'), xlabel('Voltaje [V]'),grid on, xlim([0 32]) %Especificaciones del eje x

yyaxis left %Eje y izquierdo

plot(V,I1,'DisplayName','Curva I-V Canadian Solar') %Gráfico de curva del banco

hold on

plot(V,I,'DisplayName','Curva I-V modelada')%Grafico de curva modelada

%% desviacion estandar al panel completo

I=imread('Canadian1gris4.png'); %Lee la imagen

I=rgb2gray(I);

imshow(I);

%% Calculo general del panel

Media=mean2(I) %Calcula la media de toda la imagen

Desviacion_estandar=std2(I); %Calcula la desviación estandar de toda la imagen

coeficiente_variacion=Desviacion_estandar/Media %Calcula el coeficiente de variación de toda la imagen

%% Calculo por pixeles

p=imtool(I);

pixel = double(getimage(p));

desviacion=double(stdfilt(pixel));

coeficiente=desviacion./pixel;

Referencias

- [1] Photovoltaic Engineering Handbook, F. Lasnier & T. G. Ang, primera edición, editorial Adam Hilger, Estados Unidos, 1990.
- [2] Lastras, A. (2022). Material de clase “Física y tecnología de dispositivos optoelectrónicos.
- [3] ¿De qué están hechos los paneles solares? (s.f). INELDEC, Ingeniería eléctrica. <https://ineldec.com/de-que-estan-hechos-los-paneles-solares-fotovoltaicos/>
- [4] NREL. (2023). Best Research-Cell Efficiencies. [Gráfico]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [5] Novoa, J, et al. (2020). Determinación de la eficiencia de un mini panel solar fotovoltaico: Una experiencia de laboratorio en energías renovables. Educación química. Revistas UNAM. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.2.70300>
- [6] Salas, L, García, A, et al. (2022). Electroluminescent Characterization of Commercial Solar Panels with a Commercial Photographic Camera. Avances de investigación en sistemas eléctricos y energéticos. Coordinación Académica Región Altiplano COARA-UASLP. 10-13.
- [7] LIFEPIXEL. (s.f.). Life Pixel – Canon 50D DIY Digital Infrared Conversion Tutorial. <https://www.lifepixel.com/tutorials/infrared-diy-tutorials/canon-50d-ir>
- [8] De León, 2015. Estación de pruebas para paneles fotovoltaicos. [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- [9] IEA (2020). Evolution of solar PV module cost by data source, 1970-2020. International Energy Agency. Recuperado de: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-solar-pv-module-cost-by-data-source-1970-2020>