

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE PANELES
FOTOVOLTAICOS POR EL MÉTODO DE
ELECTROLUMINISCENCIA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Joseph Aldair Prado López

ASESOR:

Dr. Carlos Alberto Paragua Macuri


Lima, octubre, 2024

Informe de Similitud

Yo, Carlos Alberto Paragua Macuri, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería – Sección Electricidad y Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: “ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE PANELES FOTOVOLTAICOS POR EL MÉTODO DE ELECTROLUMINISCENCIA”, del autor Joseph Aldair Prado López, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 12/10/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel, 12 de octubre del 2024

Apellidos y nombres del asesor: Paragua Macuri, Carlos Alberto	
DNI: 41843144	Firma 
ORCID: 0009-0005-1695-0857	

RESUMEN

El uso de paneles fotovoltaico ha permitido obtener energía renovable y amigable con el medio ambiente, pues tiene un impacto positivo en la reducción de gases de efecto invernadero. Su rápida popularidad y su acelerado desarrollo tecnológico ha permitido la comercialización de paneles en distintos ámbitos. Sin embargo, estos paneles pueden presentar defectos en sus celdas que en algunos casos no pueden visualizarse e influyen en su performance y como consecuencia en su tiempo de vida; por eso, existen las técnicas de trazador de curvas I-V, la termografía y la electroluminiscencia que permiten obtener la información del estado del panel fotovoltaico. En este trabajo de investigación, se ahonda en la técnica de electroluminiscencia que permite obtener imágenes de alta resolución para analizar los defectos presentes en un panel. Utilizando el sistema de electroluminiscencia “*LumiSolarOutdoor*”, esta técnica se aplicó a los paneles fotovoltaicos de sistemas conectados a la red en la facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú con el objetivo de constituir una base de datos que servirá para el entrenamiento de la red neuronal pre entrenada “*ResNet-50*” que realizará la clasificación de su tecnología y del estado de degradación de cada celda que constituye el panel. El algoritmo planteado realiza un preprocesamiento, filtrado, segmentación, extracción de características y clasificación a las nuevas imágenes que se les desea analizar. Además, permite la relación de un modelo eléctrico que traza la curva I-V en base los datos de la placa del panel y los resultados de la clasificación por celda.

Palabras claves: Electroluminiscente, fotovoltaico, sostenibilidad, procesamiento digital de imágenes, panel solar, red neuronal, aprendizaje automático.

Dedicatoria

A Dios por estar conmigo en cada momento importante de mi vida, por brindarme fuerzas y sabiduría ante las dificultades y adversidades de la vida.

A mis padres, Mirtha y José Luis, por el apoyo incondicional y la confianza que depositaron en mí durante este camino académico.

A mis hermanos Sebastián, Mathías y Nicolás, quienes han sido mi motivo de esfuerzo y a no rendirme nunca. Cada obstáculo que enfrenté fue superado con la visión de vuestro orgullo en mí.



Agradecimiento

A mi asesor Dr. Carlos Paragua, por ser mentor y guía en el camino de la investigación. Por la confianza y orientación durante el proceso de la tesis. Su apoyo hacia mi persona ha sido esencial en el logro de esta investigación.

Al grupo MatER-PUCP por proveer los recursos, ambientes y datos necesarios para el desarrollo de la investigación. En especial al profesor Jan Palomino, José Angulo y Dante Mendoza, quienes compartieron hacia mi persona su conocimiento, tiempo y experiencia.

Al profesor Andrés Flores, cuya orientación fue indispensable en la obtención de resultados en la tesis. Su experiencia y conocimiento respecto al procesamiento de imágenes permitieron explorar soluciones sólidas para el estudio.

A mis tías Isela y Giuliana, quienes me brindaron un hogar y me hicieron sentir que no estaba lejos de casa. También quiero extender mi gratitud a todos los familiares que estuvieron a mi lado y me apoyaron en este camino.

A mis amigos de la universidad, con quienes compartí vivencias inolvidables. Su compañía y apoyo han sido invaluable para mí.

A mi compañera de viaje, quien estuvo a mi lado en este camino. Cada palabra de ánimo y cada consejo me ayudaron a no rendirme y continuar con mis metas. Ahora es tu turno de no rendirte y lograr tus objetivos.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1: TECNOLOGÍAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS Y TÉCNICAS PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO DE SU SISTEMA	3
1.1 Funcionamiento de los paneles fotovoltaicos	3
1.1.1 Celda fotovoltaica	3
1.1.2 Efecto fotovoltaico	5
1.1.3 Tecnologías de los paneles fotovoltaicos	5
1.1.3.1 Paneles monocristalinos	6
1.1.3.2 Paneles Policristalinos	6
1.1.3.3 Paneles de capa fina	7
1.1.3.4 Innovaciones en Paneles y Tecnologías emergentes	8
1.2 Técnicas para el diagnóstico de paneles fotovoltaicos	9
1.2.1 Análisis de curva I vs V y P vs V	9
1.2.2 Termografía	10
1.2.3 Electroluminiscencia	11
1.3 Aplicación de la electroluminiscencia en la evaluación de paneles fotovoltaicos	12
1.4 Justificación	15
1.5 Objetivos	16
1.5.1 Objetivo principal	16
1.5.2 Objetivos secundarios	16
Capítulo 2: FUNDAMENTOS Y HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE IMÁGENES Y EL ANÁLISIS DEL MÉTODO DE ELECTROLUMINISCENCIA APLICADA EN PANELES FOTOVOLTAICOS	17
2.1 Fundamentos teóricos	17
2.1.1 Radiación Solar	17

2.1.2 Estructura del módulo fotovoltaico	19
2.1.3 Circuito eléctrico equivalente	20
2.1.4 Pasos fundamentales del procesamiento de imágenes digitales	22
2.2 Descripción del sistema de medición de EL	24
2.2.1 Esquema funcional	24
2.2.2 Condiciones ambientales	25
2.3 Equipos y materiales para la aplicación de método de EL	26
2.3.1 Instrumentación para la aplicación del método de EL	26
2.3.2 Cámara de electroluminiscencia	28
2.3.2.1 Sensor CCD	29
2.3.2.2 Sensor CMOS	30
2.3.2.3 Sensor InGaAs	30
2.3.4 Software para cámara de electroluminiscencia	30
2.4 Tipos de defectos	32
2.4.1 Grietas en celdas	32
2.4.2 Humedad de paneles fotovoltaicos	33
2.4.3 Degradación inducida por potencial	33
2.4.4 Pérdida de continuidad y cortocircuito	34
2.5 Métodos de análisis de datos	34
2.5.1 Análisis cualitativo	35
2.5.2 Análisis cuantitativo	36

Capítulo 3: ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE ELECTROLUMINISCENCIA Y DESARROLLO DEL PROCESAMIENTO 38

3.1 Especificaciones técnicas del arreglo utilizado	38
3.1.1 Detalles técnicos de paneles fotovoltaicos estudiados	38
3.1.2 Detalles técnicos del sistema de electroluminiscencia	39
3.1.2.1 Detalles técnicos de fuente de la alimentación externa	40

3.1.2.2 Detalles técnicos de la cámara	41
3.1.2.3 Periféricos y accesorios requeridos en el montaje experimental	42
3.2 Adquisición y selección de imágenes de Electroluminiscencia	46
3.3 Desarrollo del procesamiento de imágenes	48
3.3.1 Etapa de Pre-Procesamiento	48
3.3.2 Etapa de clasificación por Tecnología	51
3.3.3 Etapa de Segmentación	52
3.3.4 Etapa de Extracción de características	55
3.3.5 Etapa de Clasificación por Celda	56
3.4 Modela Eléctrico de Panel fotovoltaico	56
Capítulo 4: PRUEBAS Y RESULTADOS	58
4.1 Resultados de la Extracción de características por Celda	58
4.2 Resultados del Entrenamiento de Clasificación por Tecnología	59
4.3 Resultados de la validación de la Red Neuronal Entrenada	60
4.4 Resultados del Entrenamiento de la Red Neuronal para la clasificación de celdas	62
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	67
BIBLIOGRAFÍA	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Esquema de una celda fotovoltaica	3
Figura N°2: (a) Leyenda de las 5 principales tecnologías. (b) Valores de eficiencias para celdas de distintas tecnologías.....	4
Figura N°3: Efecto fotovoltaico.....	5
Figura N°4: Tecnologías de Paneles fotovoltaicos.....	6
Figura N°5: Modelo de funcionamiento de los paneles bifaciales	8
Figura N°6. Modelo de curva I vs V/ P vs V.....	9
Figura N°7. Espectro electromagnético con las subdivisiones del espectro infrarrojo.....	10
Figura N°8. Aplicación de la termografía en paneles fotovoltaicos.....	11
Figura N°9. Espectros relativos	12
Figura N°10. Esquema experimental para la aplicación de la técnica de electroluminiscencia.....	13
Figura N°11. Imagen de un mismo módulo a simple vista y bajo la técnica de electroluminiscencia.....	14
Figura N°12. Defectos y fallas encontradas en celdas fotovoltaicas.....	14
Figura N°13. Espectro de radiación solar	17
Figura N°14. Trayectoria de la radiación.....	18
Figura N°15. Estructura de un módulo fotovoltaico	19
Figura N°16. Esquema general de una instalación fotovoltaica.....	20
Figura N°17. Circuito equivalente de un panel fotovoltaico.....	21
Figura N°18. Etapas fundamentales de procesamiento de imágenes.....	22
Figura N°19. Estructura del fenómeno de electroluminiscencia.....	25
Figura N°20. (a) (b) Estructura de cuarto oscuro para imágenes EL[52] (c) Imagen real del set de medición sobre cubierta, para la realización de EL en horario nocturno.....	26
Figura N°21. Espectro de emisión c-Si, Cdte, a-Si, CIGS	28
Figura N°22. (a) DU491A InGaAs Spectroscopy CCD[54] (b) Clara Interline CCD[55] (c) Zyla 4.2 CMOS.....	29
Figura N°23. Software Greateyes LumiSolar Outdoor 9.0	31
Figura N°24. Software PCO CAMWARE	31
Figura N°25. Clasificación de defectos de una imagen de EL	32
Figura N°26. Lámina protectora del panel trasero agrietada después de ocho años de funcionamiento.....	33
Figura N°27. Ejemplo de punto de soldadura quemado	34
Figura N°28. Proceso de análisis cualitativo a imágenes de Electroluminiscencia.....	35
Figura N°29. Resultados experimentales	36
Figura N°30. Agrupación de celdas en función de su degradación por PID	37

Figura N°31. Paneles fotovoltaicos instalados en la azotea de la Facultad de Física – PUCP.....	38
Figura N°32. Sistema de medición de electroluminiscencia	40
Figura N°33. (a)Batería del Sistema de medición de electroluminiscencia. (b)Interfaz de la batería	41
Figura N°34. (a)Cámara “LumiSolar Outdoor”. (b)Terminales de conexión	42
Figura N°35. (a)Terminales conectados en la interfaz de la batería. (b) Inicialización del software.....	44
Figura N°36. Ventana de Adquisición de imágenes	45
Figura N°37. Software “LumiSolar Outdoor”	45
Figura N°38. Montaje experimental del sistema de Electroluminiscencia.....	46
Figura N°39. Base de datos de imágenes de Electroluminiscencia de Paneles fotovoltaico.....	47
Figura N°40. Desarrollo de los procesos realizados.....	48
Figura N°41. Imagen original de Electroluminiscencia de Panel Fotovoltaico.....	49
Figura N°42. Histograma de valores de intensidad de los pixeles.....	49
Figura N°43. (a) Imagen original de Electroluminiscencia de Panel Fotovoltaico. (b) Imagen umbralizada con zona de interés de Panel Fotovoltaico. (c) Imagen limita por área de interés.....	50
Figura N°44. Comparación de redes neuronales pre entrenadas.....	51
Figura N°45. Diagrama de entrenamiento de Red Neuronal.....	52
Figura N°46. (a) Imagen limitada de EL de Panel Fotovoltaico. (b) Imagen limitada y filtrada de EL de Panel Fotovoltaico.....	53
Figura N°47. (a)Aplicación del filtro “Solbel” eje y. (b) Aplicación del filtro “Solbel” eje x. (c) Imagen resultante de los filtros en cada eje. (d) Imagen segmentada por el filtro “Solbel”. (e) Imagen segmentada por bordes dilatados.....	54
Figura N°48. Imagen de EL segmentada de Panel Fotovoltaico con defecto.....	54
Figura N°49. Histograma de áreas que constituyen las celdas.....	55
Figura N°50. Extracción de característica de las celdas del Panel fotovoltaico.....	55
Figura N°51. Diagrama de entrenamiento de Red Neuronal.....	56
Figura N°52. Modelo de una celda fotovoltaica de un diodo mediante MATLAB/Simulink.....	57
Figura N°53. Curvas I-V del Modelado del Panel Fotovoltaico.....	57
Figura N°54. Resultados de la extracción de características por Celda.....	58
Figura N°55. Resultados erróneos de la extracción de características por Celda.....	59
Figura N°56. (a) Panel Canadian_20011 (b) Panel panasonic_NE29802 (c) Panel panasonic_NE31242	61
Figura N°57. Clasificación correcta de celdas con defectos.....	62
Figura N°58. Clasificación incorrecta de celdas con defectos	63
Figura N°59. IEEE MELECON 2024.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Resumen de la comparación de diferentes tecnologías de celdas solares.....	7
Tabla N°2. Resumen comparativo entre métodos de diagnóstico.....	13
Tabla N°3. Instrumentación del método de Electroluminiscencia.....	27
Tabla N°4. Lista de ejemplo de cámaras para el método de Electroluminiscencia.....	29
Tabla N°5. Comparación de las características técnicas y cualitativas entre tipos de sensores para cámaras de EL.....	30
Tabla N°6. Detalles técnicos de paneles fotovoltaicos.....	39
Tabla N°7. Detalles técnicos de Batería “LumisSolarOutdoor”.....	40
Tabla N°8. Detalles técnicos de la Cámara “LumiSolar Outdoor”	42
Tabla N°9. Accesorios complementarios del Sistema “LumiSolar Outdoor”	43
Tabla N°10. Distribución de imágenes de electroluminiscencia por Carpeta	47
Tabla N°11. Número de pruebas del entrenamiento de la Red Neuronal para clasificación de Tecnología	59
Tabla N°12. Número de pruebas del entrenamiento de la Red Neuronal para clasificación de Tecnología	60
Tabla N°13. Resultado de la validación de la Red Neuronal Entrenada	60
Tabla N°14. Número de pruebas del entrenamiento de la Red Neuronal para clasificación de Celda	62

INTRODUCCIÓN

La energía fotovoltaica se presenta como una solución ante la búsqueda de recursos renovables que sean amigables con el medio ambiente, es decir que no suponga una amenaza para el ambiente ante la emisión de gases de efecto invernadero [1]. En los últimos años, esto ha llevado un crecimiento acelerado de la potencia total acumulada por las plantas solares. Un ejemplo de ello, es el surgimiento de granjas solares que generan energía eléctrica para plantas industriales donde abarcan una gran cantidad de paneles fotovoltaicos que en consecuencia el mantenimiento se convierte en un problema no trivial [2].

La energía producida por los paneles fotovoltaicos depende de las condiciones ambientales y del estado físico del panel. Por ello, la presencia de algún defecto puede influir en la performance de un panel y por consecuencia afecta en su vida útil. Una de las tres técnicas que permiten identificar la presencia de algún defecto es la Electroluminiscencia, en la cual se permite visualizar defectos que a simple vista no son identificados por el ojo humano[3].

Esta técnica de diagnóstico va de la mano del concepto de sostenibilidad ya que la electroluminiscencia permitirá intervenir para identificar los defectos presentes en un panel fotovoltaico para verificar su vida útil. Algunos ejemplos de investigaciones sobre sostenibilidad y el impacto del uso de energía fotovoltaica son [4], [5]. Asimismo, dentro de la bibliografía se encuentran los siguientes artículos [6], [7] donde análisis estadísticos determinaron que muchas veces los paneles en condiciones de operación no alcanzan la vida útil indicada por el fabricante.

El objetivo principal de este trabajo consiste en realizar un análisis y diagnóstico del estado físico de los paneles fotovoltaicos existentes en la facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Por medio de la técnica de electroluminiscencia, se obtendrá una base de datos que servirá para el entrenamiento de una red neuronal que clasificará la tecnología del panel y el estado físico de cada celda. Así mismo, la clasificación obtenida de cada celda junto a los datos de placa del panel será valores de entrada para el modelo eléctrico que generará las curvas I-V ideales del panel.

Este trabajo de investigación se divide en cuatro capítulos principales: el primer capítulo describe en las tecnologías de los paneles fotovoltaicos y las técnicas existente para el análisis de su rendimiento. El segundo brinda los fundamentos teóricos y las herramientas requeridas para la aplicación de la técnica de electroluminiscencia y el uso del procesamiento digital de

imágenes. En el tercer capítulo se detalla las características de las imágenes que constituyen la base de datos y el desarrollo del procesamiento digital de imágenes. Por último, el cuarto capítulo se detallan las pruebas realizadas junto a los resultados obtenidos, así como las conclusiones.



CAPÍTULO 1: TECNOLOGÍAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS Y TÉCNICAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE SU SISTEMA

1.1 Funcionamiento de los paneles fotovoltaicos

El principal objetivo de los paneles es generar energía eléctrica, ello lo realiza mediante principios de funcionamiento relacionados al material de sus celdas y a su estructura. Todas las tecnologías operan bajo el mismo principio de funcionamiento; sin embargo, pueden ser clasificadas mediante características cuantitativas y cualitativas.

1.1.1 Celdas fotovoltaicas

Los paneles fotovoltaicos están constituidos principalmente de celdas solares, las cuales están fabricados de un material semiconductor que por medio del efecto fotovoltaico tienen la capacidad de transformar la energía solar en energía eléctrica [8]. Tiene un comportamiento similar al diodo, debido a la unión p-n en su estructura que produce una diferencia de potencial que mediante el flujo de electrones genera una corriente eléctrica [9].

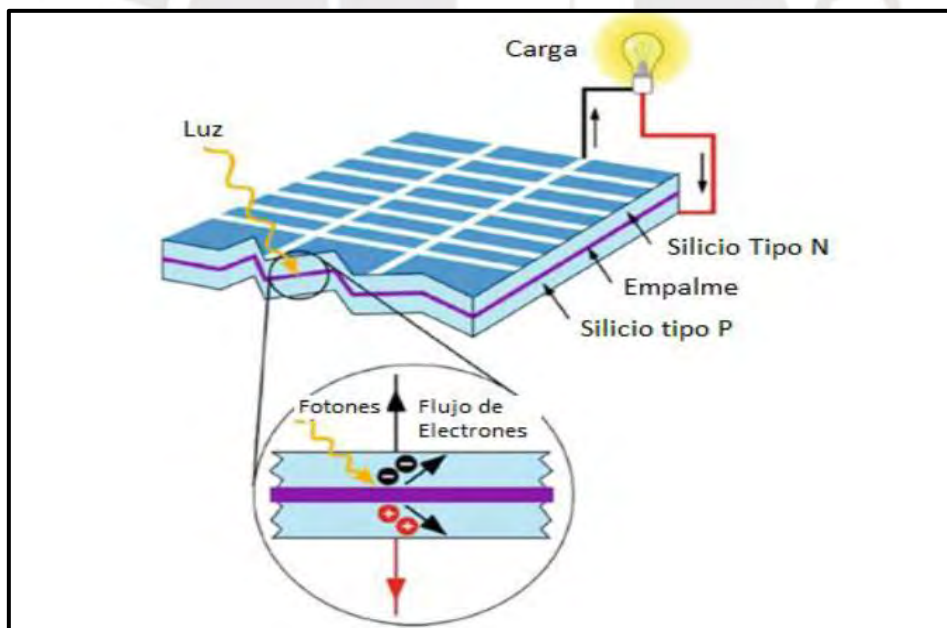
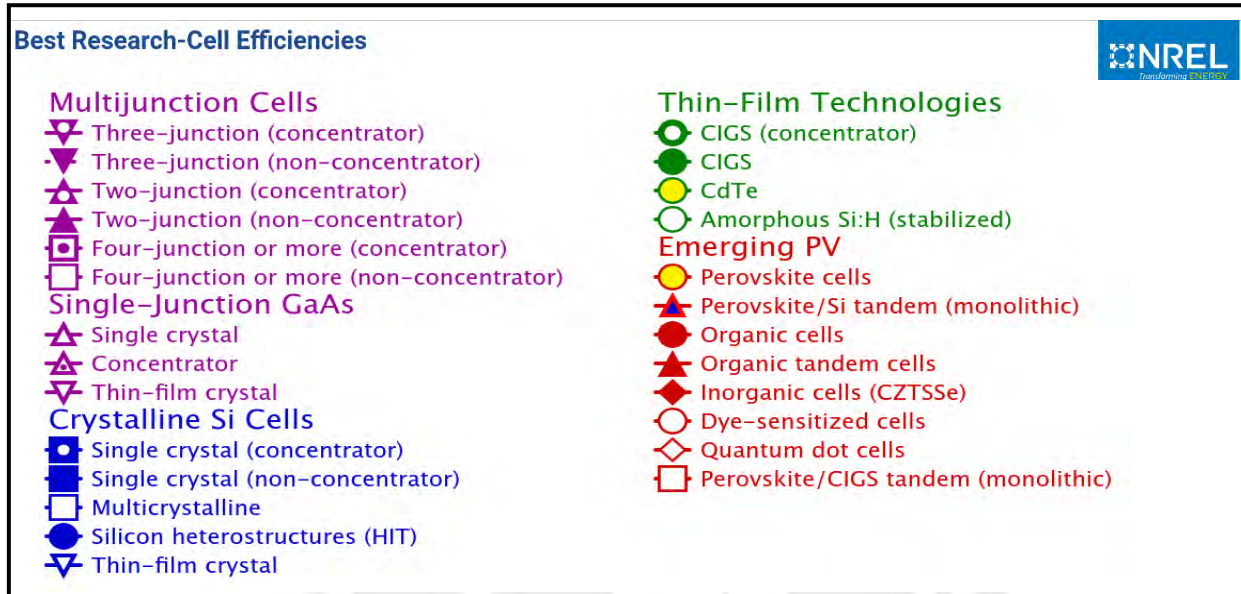


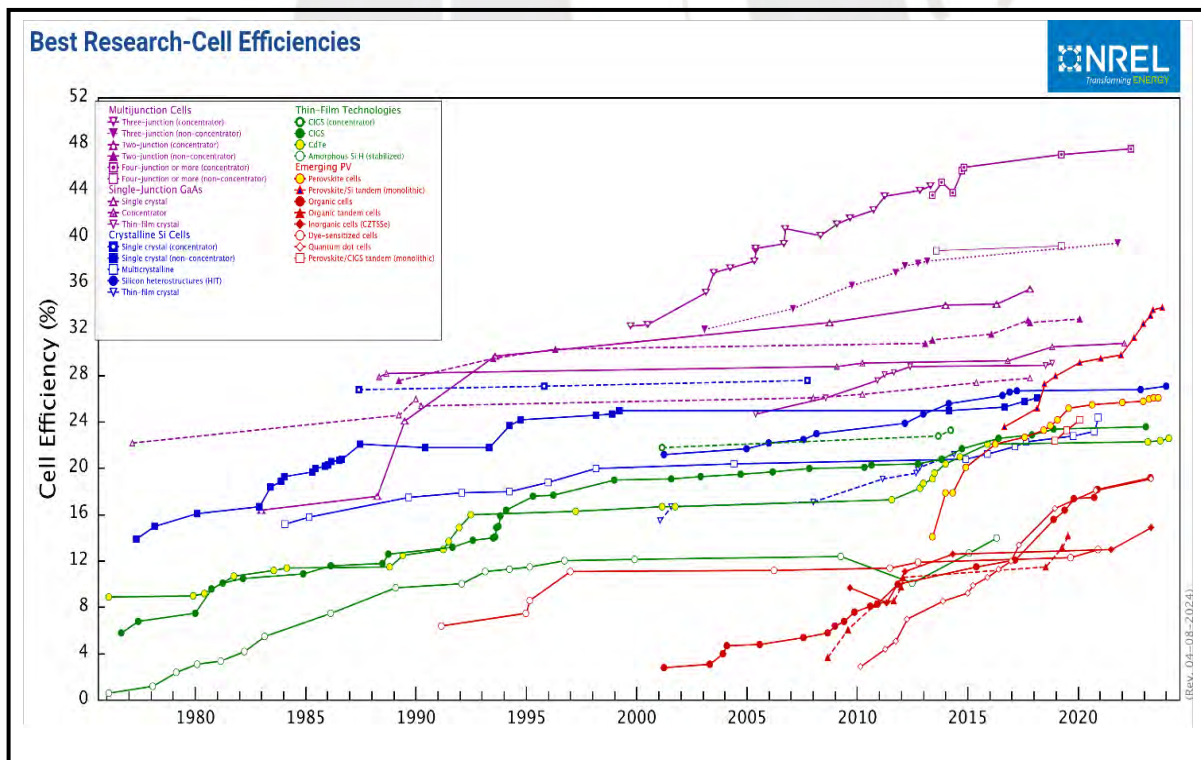
Figura N°1: Esquema de una celda fotovoltaica [10]

En la Figura 1, se presenta un esquema funcional básico de un panel fotovoltaicas. En dicho esquema se representa el efecto fotovoltaico y el uso del Silicio en la capa del material semiconductor. En la actualidad, el uso del silicio como responsable de la conversión de la energía solar en eléctrica, es usada comúnmente en las diferentes tecnologías debido a sus características semiconductoras. Sin embargo, producto de la búsqueda de una mayor eficiencia

en la obtención de energía eléctrica han surgido nuevas tecnologías con distintas propiedades y estructura [10]. En la Figura 2, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) detalla mediante un gráfico el crecimiento de las eficiencias de las celdas de cinco principales tecnologías durante los últimos 50 años [11].



(a)



(b)

Figura N°2: (a) Leyenda de las 5 principales tecnologías. (b) Valores de eficiencias para celdas de distintas tecnologías [11]

1.1.2 Efecto fotovoltaico

La base funcional de las celdas fotovoltaicas consiste en el efecto fotovoltaico. Este efecto, genera una corriente eléctrica por medio de la interacción de la luz sobre materiales semiconductores. Convierte la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) [12].

Para su funcionamiento en las celdas fotovoltaicas, la capa superior de material semiconductor debe ser tipo N (carga negativa) y la capa inferior tipo P (carga positiva). La capa de tipo N está expuesta a la radiación y cuando recibe la energía solar en forma de fotones, ocasiona sobre los electrones la suficiente energía para saltar de un nivel de enlace atómico estable a uno que permite generar un movimiento. En la figura N°3, se puede observar el funcionamiento del efecto fotovoltaico, donde se traslada electrones de la capa N a la capa P y el flujo de electrones genera como consecuencia corriente continua [8], [12], [13].

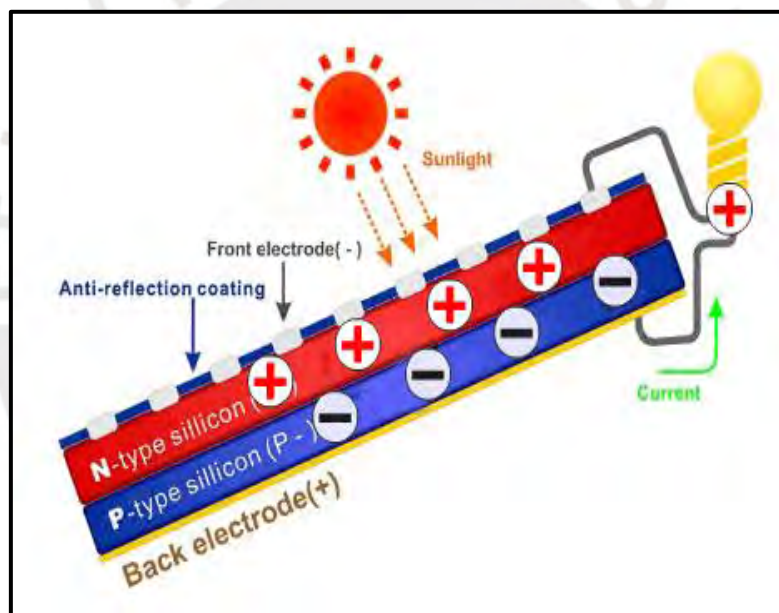


Figura N°3: Efecto fotovoltaico [14]

1.1.3 Tecnologías de los paneles fotovoltaicos

Todos los paneles fotovoltaicos cumplen la misma función, la cual es transformar la energía luminosa en energía eléctrica. Sin embargo, tienen diferencias en sus características que permiten poder clasificarlos según su tecnología de celdas, eficiencia energética, aplicación, tipo de conexión u orientación y costo. Su clasificación más común es en base a su tecnología, dentro de ella existen tres principales.

1.1.3.1 Paneles monocristalinos

Son fabricados por una sola pieza de cristal de silicio de alta pureza, lo que le permite una eficiencia promedio en torno a 18% - 22%. Estas características comparadas a los paneles policristalinos, son superiores y ello es debido a que la oblea de silicio es de un solo cristal. Sin embargo, su fabricación y producción es compleja y por consecuencia tiene un costo mayor [15], [16]. Kunta Yoshikawa en el 2017 realiza una investigación donde señala el camino para obtener el límite teórico de eficiencia de 29,1% para celdas solares de silicio (Si) mediante su hetero unión [17], lo que permitió que bajo dicho principio surjan tecnologías que se aproximen a dichos valores de eficiencia deseados como se puede apreciar en el diagrama del NREL donde la tecnología denominada HIT hasta el 2023 tiene una mayor eficiencia dentro del grupo de los paneles fabricados con celdas monocristalinas. En la Figura N°4 se puede apreciar que los paneles monocristalinos tienen una apariencia uniforme y un color azul oscuro, lo que lo diferencia de los paneles policristalinos.

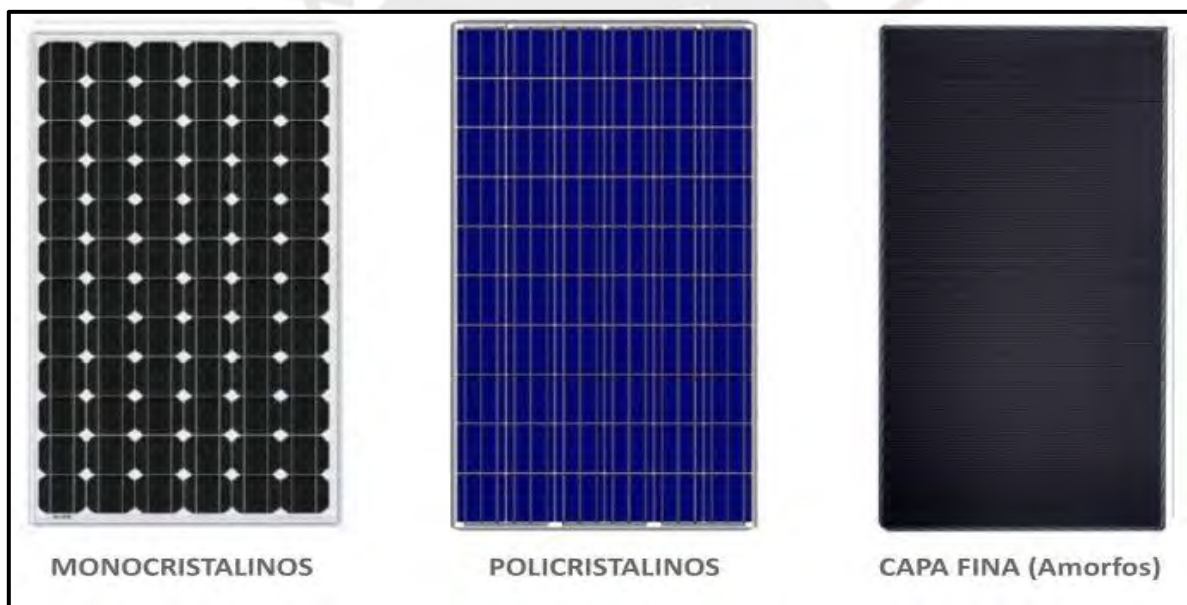


Figura N°4: Tecnologías de Paneles fotovoltaicos[18]

1.1.3.2 Paneles policristalinos

Son fabricados con silicio, pero a diferencia de los paneles monocristalinos, estos están fabricados con múltiples fragmentos de silicio fundido. La eficiencia que se obtiene es alrededor de 11% - 14%, lo que llevaría a convertir a estos paneles en un rendimiento más limitado. Sin embargo, la producción de sus celdas es más fácil y económica [16], [19]. En la figura N°4 se aprecia un panel policristalino, el cual puede ser fácilmente diferenciado debido a su color y la estructura de su superficie.

1.1.3.3 Paneles de capa fina

Engloban distintas tecnologías, dentro de ella se encuentra las celdas fabricadas en base a CdTe (Teluro de Cadmio), a-Si (Silicio Amorfo) y CIS (cobre, indio y selenio). Estos paneles fueron creados principalmente con el objetivo de reducir costos de fabricación y optar por nuevos materiales semiconductores [18]. En consecuencia, la eficiencia de estos paneles es menor comparado con los paneles monocristalinos y policristalinos, pero su bajo costo y su flexibilidad lo hace rentable para algunas aplicaciones. Hasta el año 2000, se reportó que las celdas de CIGS revolucionarían el mundo de la energía fotovoltaica, pues obtendrían una eficiencia de 19%[20]. Logrando en dicho año que la tecnología CIGS tenga una producción con un bajo costo y un nivel de eficiencia mayor[16]. Sin embargo, después del año 2000 surgieron nuevas tecnologías que superaron la eficiencia indicada por dicha tecnología, la investigación realizada en el 2019 por Motoshi Nakamura indica que la eficiencia récord que podría alcanzar esta tecnología consiste en 23.35%[21].

Tabla 1. Resumen de la comparación de diferentes tecnologías de celdas solares[19] [11]

Material de celda					
Criterios de Comparación	Mono Si	Poli Si	a-Si	CdTe	CIGS
Eficiencia promedio del Panel	30% - 32%	24% - 26%	14% - 16%	18% - 22%	15% - 20%
Superficie requerida para 1 kW	6 - 8 m ²	8 - 10 m ²	10 - 12 m ²	5 - 7 m ²	6 - 8 m²
Costo promedio del módulo	400 - 500 USD/m ²		250 - 450 USD/m²		
Penetración del Mercado	85% - 90% del mercado Global		10% - 15% del mercado global		
Fabricación a partir de	Cristal de silicio	Fusión de cristales desilicio	Varias capas de semiconductor de silicio amorfo	Varias capas de semiconductor de telururo de cadmio	Varias capas de semiconductor de diselenuro de cobre e indio
Temperaturas óptimas de funcionamiento	25 grados Celsius	25 grados Celsius	20 grados Celsius	40 grados Celsius	25 grados Celsius
Performance a baja Luz	Baja		Media		
Coefficiente de Temperatura	Alto		Bajo		
Aplicaciones	Comercial / Residencial		Comercial/ Planta fotovoltaica		

En Tabla 1, se tiene un resumen comparativo de las tecnologías mencionada siguiendo unos criterios de comparación. Estos criterios permiten evaluar la mejor alternativa de paneles fotovoltaicos considerando sus características cuantitativas, cualitativas y su aplicación [19].

1.1.3.4 Innovaciones en Paneles y Tecnologías Emergentes

Se han desarrollado innovaciones en paneles fotovoltaicos en el mercado, siguiendo el mismo principio del efecto fotovoltaico, con el objetivo principal de conseguir el mayor rendimiento en cada celda y disminuir al máximo el costo de los equipos [22]. Una de estas innovaciones son los paneles fotovoltaicos bifaciales, pues estos paneles son instalados mediante una estructura que les permite aprovechar la irradiación solar por ambas caras del panel [23].

En la figura N°5, se observa el funcionamiento de los paneles bifaciales donde la irradiación solar que llega a recibir es la suma de la irradiancia directa, la irradiancia difusa y la irradiancia reflejada. Como consecuencia de ello, los paneles fotovoltaicos bifaciales producen mayor energía ya que a diferencia de los paneles convencionales, estos cuentan con celdas en ambas caras del panel. Ello permite una mayor captura de fotones con lo que se obtiene un mayor rendimiento y permite reducir el uso de áreas destinadas para su instalación [22], [23], [24].

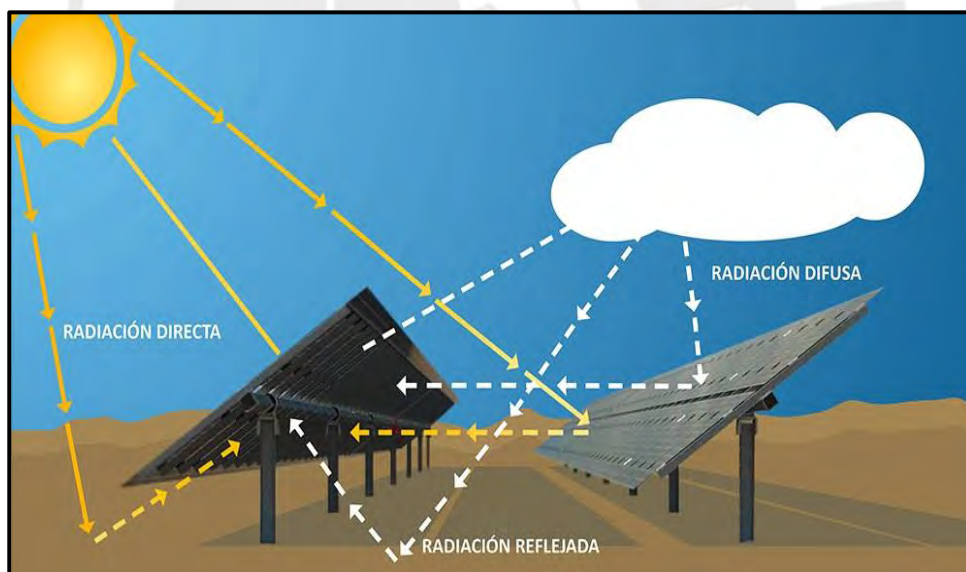


Figura N°5: Modelo de funcionamiento de los paneles bifaciales [25]

Por otro lado, se tienen las tecnologías emergentes que consisten en paneles fotovoltaicos que muestran un gran potencial referido a la eficiencia que otorgan. Sin embargo, algunas de estas tecnologías se encuentran en etapa de investigación y evaluación de costo. Un ejemplo de esto son los paneles fotovoltaicos PERC, los cuales adicionan una capa extra reflectante, ubicada entre la capa base y la capa inferior, con el objetivo de reflejar los fotones a través de la capa

de silicio. Ello permite generar mayor cantidad de electricidad, por consecuencia, mayor potencia [22]. Así mismo, en el gráfico del NREL actualizado hasta el 2024, detalla que las tecnologías de celdas Multiunión y Perovskita son las que obtienen un mayor porcentaje de eficiencia[11] y ello se pueden comprobar mediante las investigaciones realizadas por John Geisz en el 2020 mediante un artículo demuestra la obtención de 47.1% de eficiencia con el uso de una estructura metamórfica invertida de seis uniones monolíticas, es decir la unión de seis celdas fotovoltaicas[26]. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías emergentes muestran resultados óptimos de eficiencias, pero no son rentablemente económicas para el mercado.

1.2 Técnicas para el diagnóstico de paneles fotovoltaicos

Existen diferentes técnicas que permiten realizar un análisis y diagnóstico a los paneles fotovoltaicos. El objetivo de dichas técnicas consiste en evaluar el rendimiento e identificar algunos problemas de funcionamiento que influyen en la potencia que brinda los paneles. Sin embargo, no todas las técnicas brindan resultados precisos, pues algunas de ellas realizan un diagnóstico más eficiente, pero tiene un costo mayor debido a que necesitan herramientas tecnológicas de alta resolución para dicho análisis.

1.2.1 Análisis de la curva I vs V y P vs V

El análisis de la corriente vs el voltaje y la potencia vs tensión, como técnica para el diagnóstico de paneles fotovoltaicos, consiste en medir los valores de corriente, voltaje y potencia que produce el panel a medida que se varía la carga a la cual está conectada el panel. Esta técnica brinda información sobre el rendimiento, la eficiencia, potencia máxima y parámetros para modelar simulaciones fotovoltaicas[27][10].

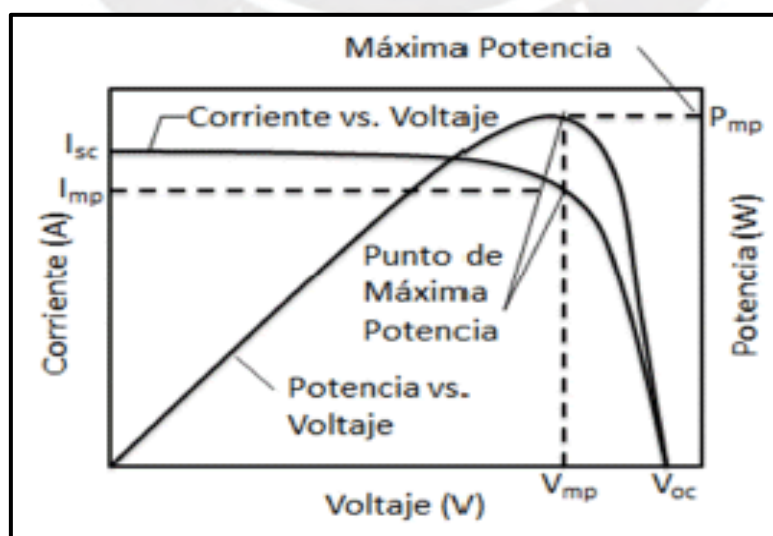


Figura N°6. Modelo de curva I vs V/ P vs V [28]

En la Figura N°6, se detalla los puntos característicos del modelo de curva I vs V y P vs V. El primer punto “Voc”, consiste en la tensión máxima disponible de una celda en condiciones de circuito abierto[16], en dicho instante la resistencia es infinita y por ende la corriente es nula. El segundo punto “Isc”, consiste en la corriente de cortocircuito, la cual es la intensidad máxima de corriente que se puede obtener en condiciones de cortocircuito[16], [28]. El tercer y cuarto punto consisten en el voltaje en el punto de máxima potencia y la corriente en el punto máximo de potencia, “Vmp” y “Imp” respectivamente. La multiplicación de los puntos anteriores produce como resultado el Punto de Máxima Potencia (Pmp), el cual es usualmente la expresión de la potencia de los paneles [10]. Este modelo de curva se halla mediante las mediciones de sus parámetros a las celdas fotovoltaicas.

1.2.2 Termografía

Esta técnica consiste en un método no destructivo que permite evaluar la temperatura de las áreas de los objetos a analizar, por medio de la medición del calor[29]. Como concepto básico, la transferencia del calor se realiza mediante ondas electromagnética, lo que permite realizar una medición remota sin contacto alguno[30]. Así mismo, la temperatura se puede medir por medio de la radiación, pues las cargas eléctricas de los átomos se encuentran en vibración debido a la temperatura y a consecuencia de ello se genera una onda electromagnética que se encuentra dentro del espectro infrarrojo[31]. En la Figura N°7, se observa el espectro electromagnético, donde la radiación infrarroja abarca un rango entre 0.7 hasta 1,000 μm de longitud de onda.

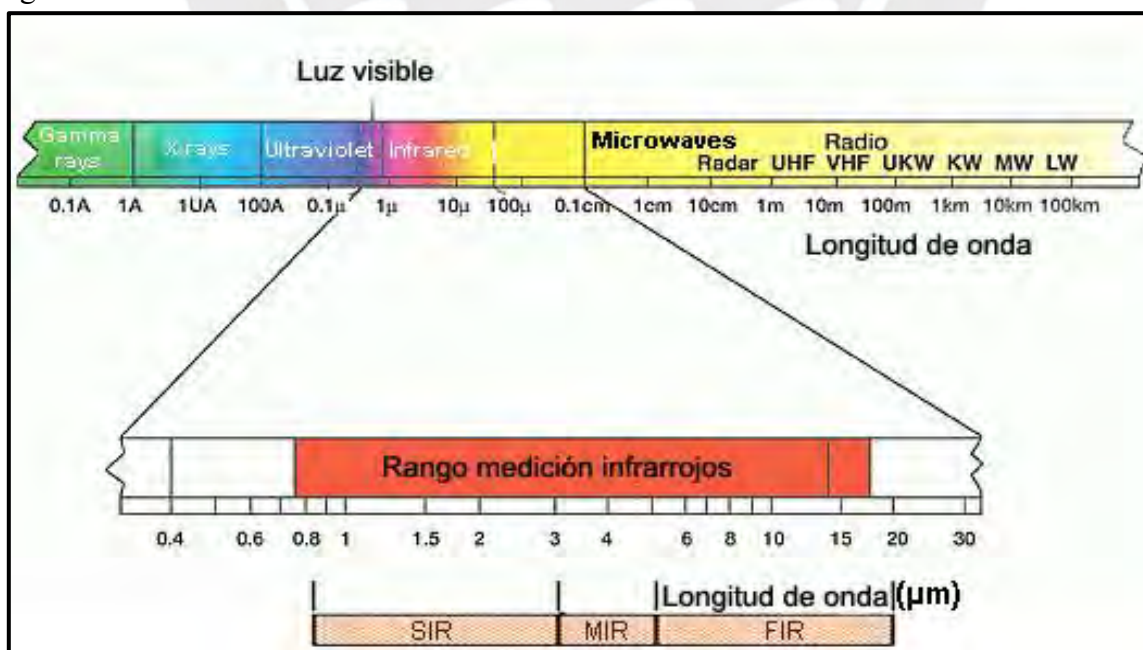


Figura N°7. Espectro electromagnético con las subdivisiones del espectro infrarrojo [32]

Las cámaras IR es la tecnología utilizada en la termografía , las cuales pueden ser clasificadas por la longitud de onda que pueden captar, dentro del rango de captación se encuentra la onda corta (0.35 a 2.5 μm), banda media (3.3 a 5 μm) y la banda larga (8 a 14 μm) que se puede evidenciar en la Figura N°7. Estas cámaras pueden detectar el calor de objetos en cualquier ángulo y área, lo que da el valor de diferencia de temperatura que se puede diferenciar por la barra de color. Existen una variedad de productos en el mercado, las cuales varían en sus especificaciones y en su aplicación. Un criterio por el cual se clasifican es el rango de longitud de onda que pueden captar[30].

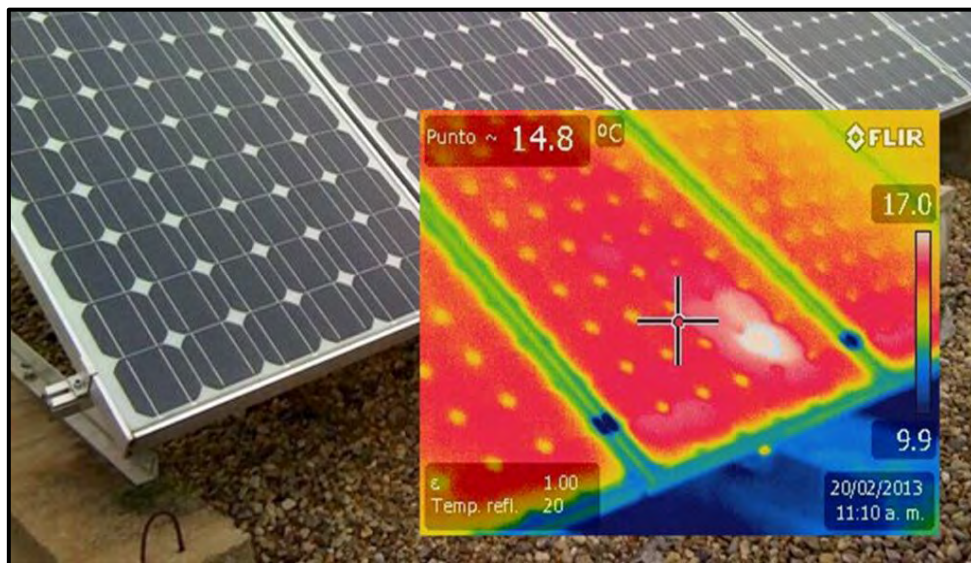


Figura N°8. Aplicación de la termografía en paneles fotovoltaicos[33]

En la figura N°8, se aprecia la aplicación de la termografía en los paneles fotovoltaicos. Por medio de las imágenes infrarrojas (IR) se pueden realizar un diagnóstico, pues cuando una celda del panel no funciona adecuadamente, la energía solar no se convierte en energía eléctrica y permanece con un exceso de calor[34]. Los principales objetivos de esta técnica consisten en identificar la ubicación de los defectos dentro del panel fotovoltaico, estimar el tamaño geométrico del área defectuosa y el impacto del área defectuosa [27].

1.2.3 Electroluminiscencia

El fenómeno de luminiscencia consiste en la emisión de luz por moléculas que se encuentran excitadas por una fuente externa. Existen distintos tipos de luminiscencia, uno de ellos es la electroluminiscencia la cual consiste en inducir la excitación de las moléculas por medio de corriente con el objetivo de elevar un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción[35]. Para observar los resultados de la emisión de luz de las moléculas, se puede realizar por medio de cámaras que cubran un rango de emisión de 1000nm – 1200nm, dicho rango se encuentra dentro del rango de medición infrarrojo, y debido a que las cámaras en dicho

rango tienen una respuesta inferior se utiliza un filtro paso alto que limita la respuesta de la cámara[36].

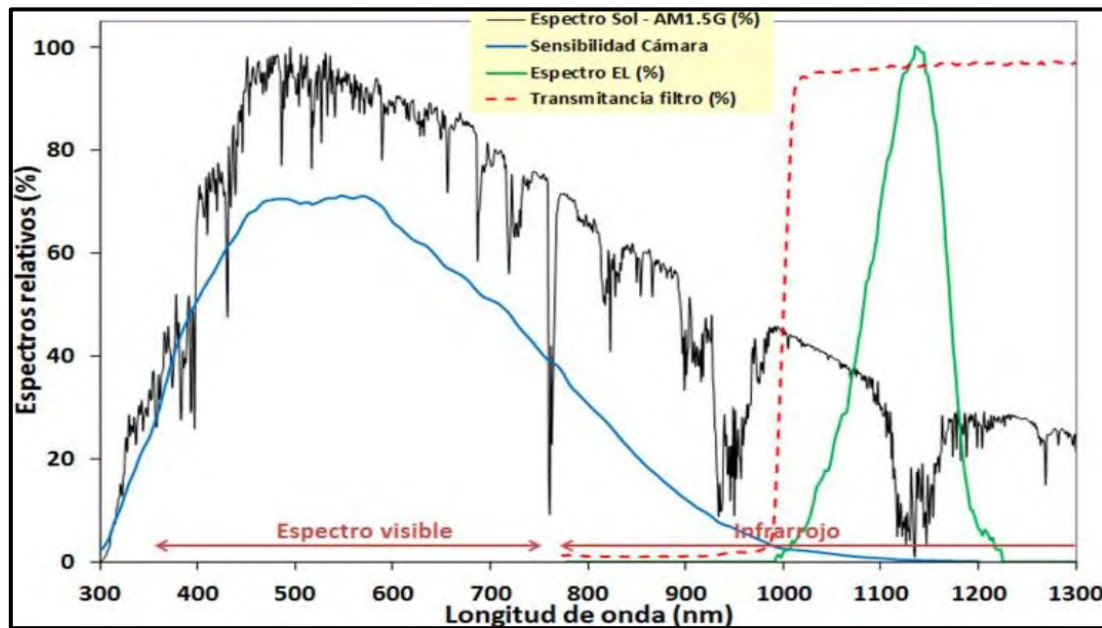


Figura N°9. Espectros relativos [36]

En la figura N°9, se identifica el espectro del sol, el rango de captación de la cámara, el espectro de electroluminiscencia y el rango del filtro. Las cámaras de electroluminiscencia pueden tener un rango de captación amplio; sin embargo, es necesario limitar dicho rango con el objetivo de evitar las perturbaciones de otros agentes de emisión de onda.

1.3 Aplicación de la electroluminiscencia en la evaluación de paneles fotovoltaicos

Es necesario tener un control sobre el estado físico de los paneles fotovoltaicos debido a que garantizamos su máximo rendimiento. En incisos anteriores 1.2.1 y 1.2.2, se detalla técnicas que permiten realizar un diagnóstico y análisis del rendimiento de las celdas; sin embargo, algunos defectos necesitan una mayor resolución para ser identificados, lo cual con la técnica de termografía no es suficiente. Por ello, en el inciso 1.2.3 se explica el concepto teórico de la técnica de electroluminiscencia, la cual aplicada en la evaluación de paneles fotovoltaicos se obtiene imágenes con alta resolución donde se identifica los defectos que a simple vista no se puede apreciar, como ejemplo de ello es la Figura N°11. Así mismo, en la Tabla N°2 se puede apreciar un resumen comparativo entre los métodos explicados en cada inciso, donde se determinan los niveles de identificación de defectos y de fiabilidad que tiene el método de electroluminiscencia, pero a la vez la necesidad que se requiere de experiencia de uso, un “Set up” como en la imagen N°10 y los niveles altos de costo.

Tabla 2. Resumen comparativo entre métodos de diagnóstico.

Métodos de diagnóstico				
Criterios de Comparación	Electroluminiscencia	Termografía	Medición de corriente y Voltaje	Inspección Visual
Nivel de identificación de defectos	Preciso	Alta	Media	Muy Baja
Habilidades o experiencia de uso	Se requiere experiencia en el uso de los equipos de electroluminiscencia y de su software	Se requiere experiencia en el uso de la termografía e interpretación de sus imágenes	Habilidades eléctricas e interpretación de mediciones	No es necesario la experiencia del usuario
Estimación del nivel de costo de aplicación	16000 USD	2100 USD	1000 USD	0 USD
Equipos o herramientas para su aplicación	Equipos de electroluminiscencia y software para su aplicación	Equipos de termografía infrarroja	Multímetro o instrumentos de medición	No requiere equipos
Fiabilidad de diagnóstico	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Seguridad en su aplicación	Baja	Baja	Media	Alta

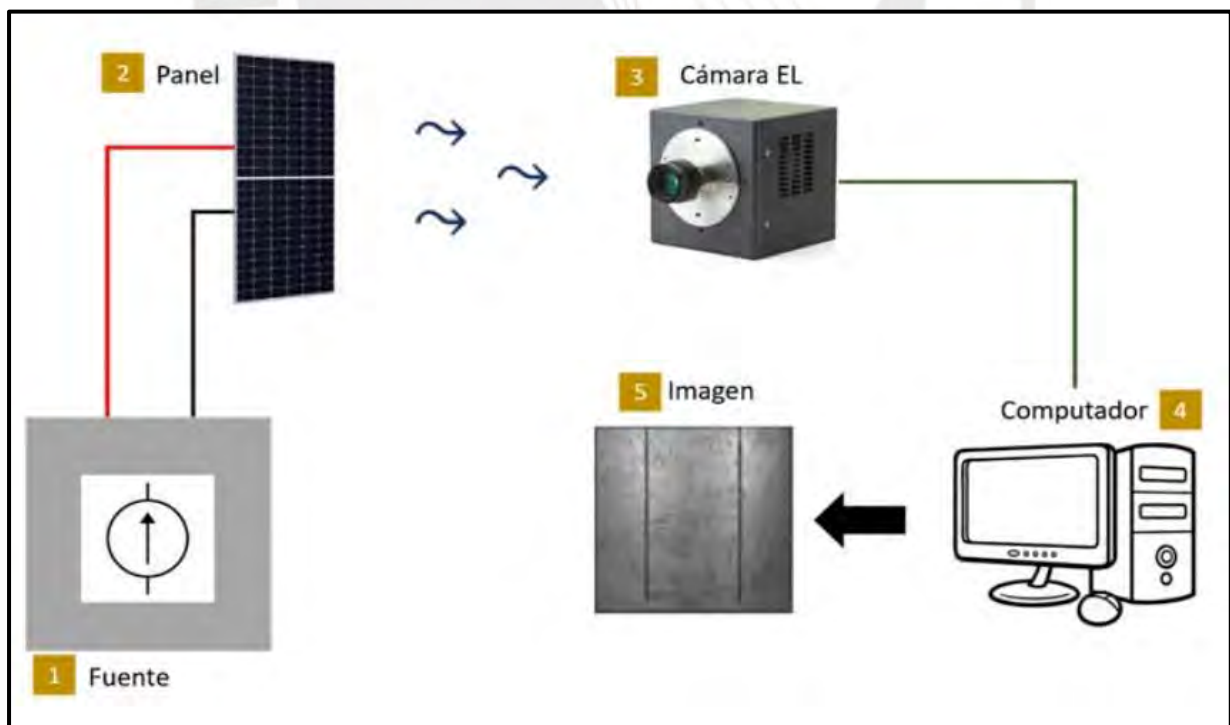


Figura N°10. Esquema experimental para la aplicación de la técnica de electroluminiscencia[37]

Los equipos primordiales necesarios para la aplicación de la técnica de electroluminiscencia se pueden apreciar en la figura N°10, el “Set up” para los ensayos en laboratorios están constituidos por una fuente de alimentación, un panel fotovoltaico, una cámara de imágenes de electroluminiscencia, interfaz de computadora con un software de procesamiento de imágenes y visualizador de imágenes, donde se obtiene imágenes de la técnica con una resolución que permite identificar defectos.

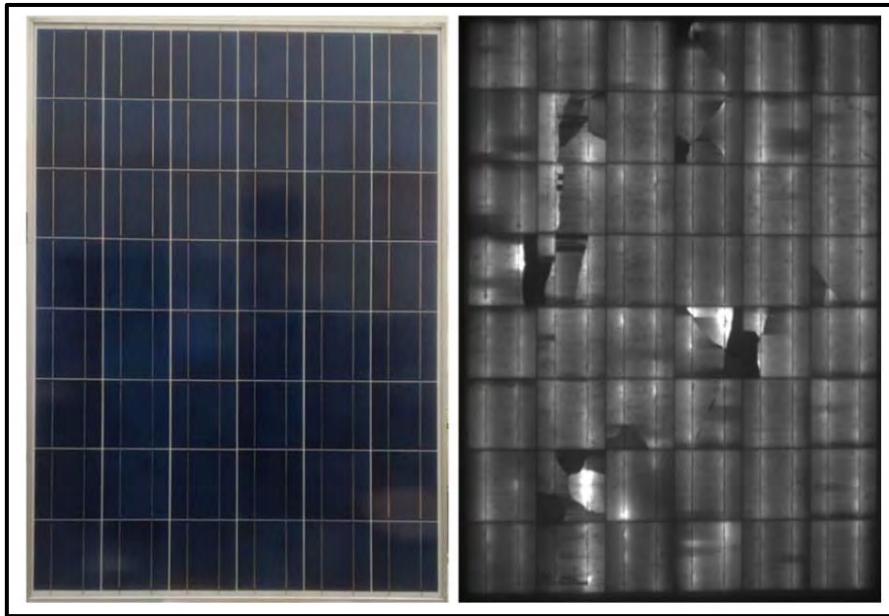


Figura N°11. Imagen de un mismo módulo a simple vista y bajo la técnica de electroluminiscencia[37]

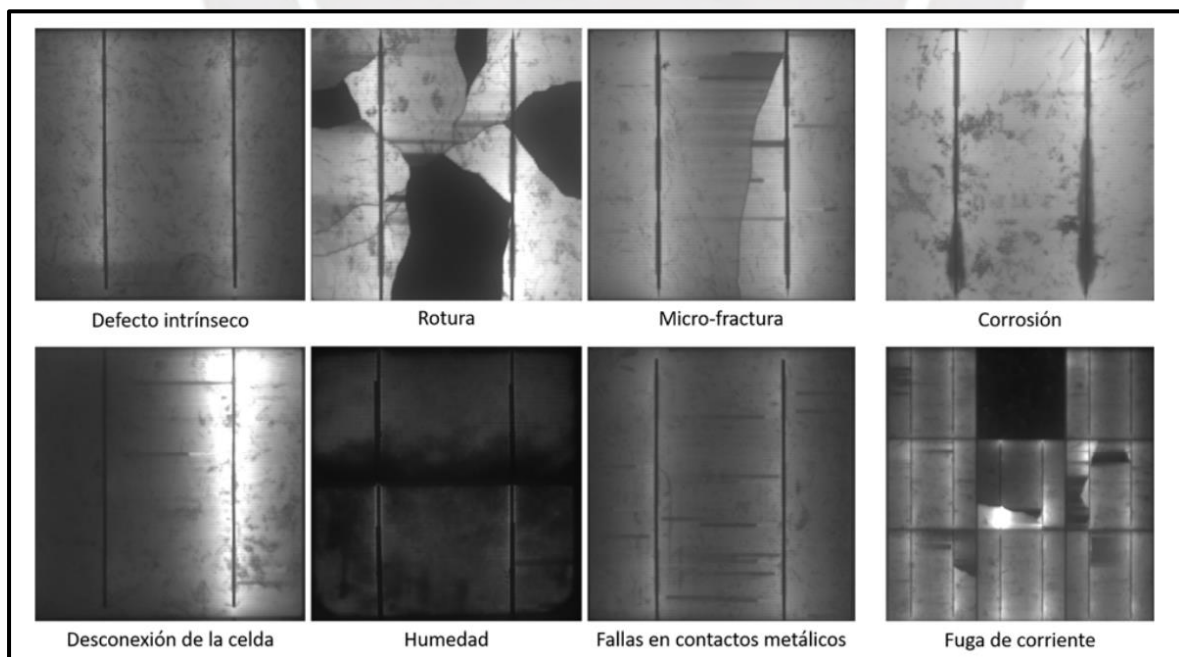


Figura N°12. Defectos y fallas encontradas en celdas fotovoltaicas[37]

La inspección por medio de la técnica de electroluminiscencia permite identificar defectos asociados a degradación inducida por potencial, corrientes parásitas, delaminaciones, corrosión electroquímica, humedad, mala resistencia de contacto, entre otros [37], [38]. En la figura N°12, se aprecia el resultado de estos defectos que comúnmente existen en los paneles fotovoltaicos por medio del software que procesa la información de la cámara. La ventaja de esta técnica es que los defectos pueden ser muy grandes o hasta muy pequeños y difuminados pero la capacidad resolutoria que brindan permite obtener resultados confiables[37].

1.4 Justificación

La búsqueda de fuentes de energías renovables y limpias ha llevado al crecimiento tecnológico de los paneles fotovoltaicos; sin embargo, cuenta con problemas que impiden que sea una fuente de energía rentable. El desarrollo de su tecnología tiene como objetivo principal limitar los costos de equipos y en paralelo aumentar su eficiencia para que su uso sea rentable comparado a otras fuentes de energía. Por ello, la importancia de este tema radica en la necesidad de analizar los problemas o defectos del estado físico de las celdas para optimizar el rendimiento de los paneles y el tiempo de vida esperado por la tecnología. Muchas plantas solares o granjas solares cuentan con sistemas que evalúan su rendimiento de los paneles; sin embargo, estos sistemas en su mayoría identifican la variación del rendimiento respecto a una medición realizada anteriormente, ya sea por mediciones de parámetros como voltaje, corriente y potencia. Pero ello solo identifica la variación de su rendimiento y no el verdadero motivo que lo ocasiona.

Existen técnicas que brindan un mayor diagnóstico al momento de analizar el estado físico de los paneles, pero se necesita precisión en dicho diagnóstico. Por tal motivo, el método de electroluminiscencia tiene un enfoque de análisis avanzado, por medio de la emisión de ondas electromagnéticas de las celdas, que por medio de la imagen obtenida de una cámara de EL se evalúa la calidad de los paneles fotovoltaicos. Permite detectar problemas de conexión, defectos ocultos, identificar celdas dañadas y evaluar la calidad del encapsulado.

En conclusión, la electroluminiscencia es un método que permite la adquisición de imágenes con una alta resolución en donde se identifican los defectos que ocasionan una disminución del rendimiento del panel fotovoltaico. Para la automatización de la identificación de defectos y la obtención de información de los paneles, se puede utilizar herramientas de software para obtener un diagnóstico certero.

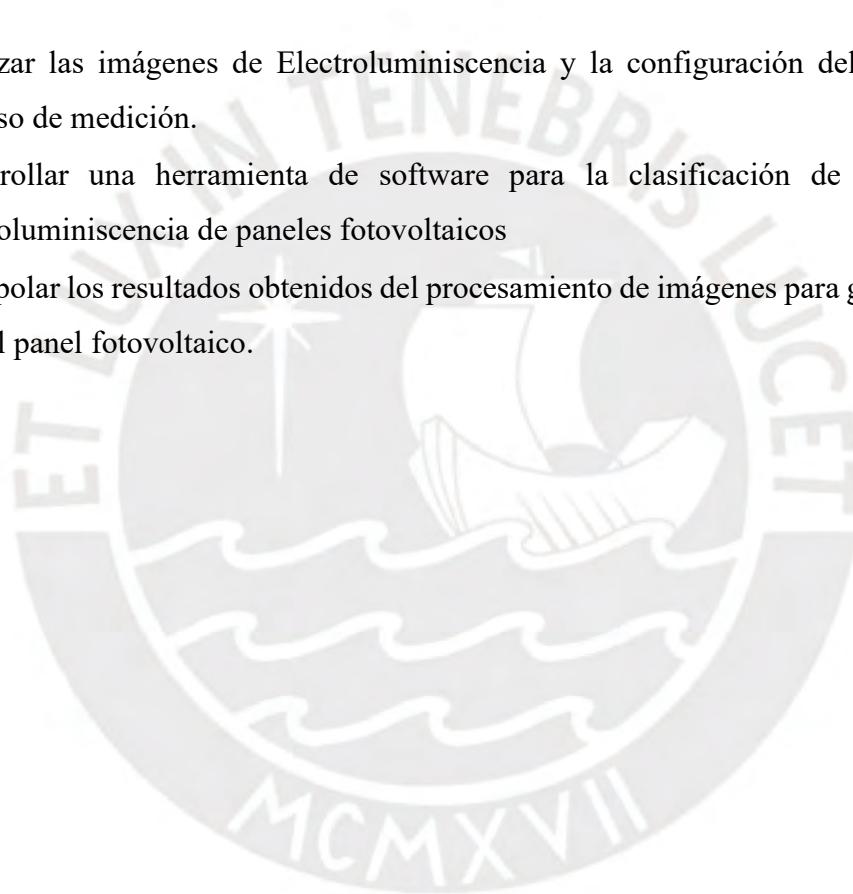
1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo principal

El objetivo principal de esta tesis consiste en desarrollar una herramienta de software que permita la evaluación automatizada de imágenes de electroluminiscencia de distintas tecnologías de paneles fotovoltaicos y analizar el estado físico de las celdas que constituyen el panel de tecnología HIT mediante el entrenamiento de una red neuronal, para extraer la información de cada celda y correlacionar los datos con su modelado eléctrico.

1.5.2 Objetivos secundarios

- Analizar las imágenes de Electroluminiscencia y la configuración del “set up” del proceso de medición.
- Desarrollar una herramienta de software para la clasificación de imágenes de electroluminiscencia de paneles fotovoltaicos
- Extrapolar los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes para generar curvas IV del panel fotovoltaico.



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS Y HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE IMÁGENES Y EL ANÁLISIS DEL MÉTODO DE ELECTROLUMINISCENCIA APLICADA EN PANELES FOTOVOLTAICOS

2.1 Fundamentos teóricos

La aplicación del método de electroluminiscencia en los paneles fotovoltaicos requiere de herramientas y procedimientos para su desarrollo. Además, es necesario profundizar en conceptos teóricos que permiten la comprensión de los resultados de este mismo.

2.1.1 Radiación solar

El flujo de energía que emite el Sol es llamada radiación solar, la cual se emite en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias [16]. La frecuencia de las ondas es asociada a su longitud. Dentro del rango espectral detallado en la Figura 13, se puede apreciar que las ondas con longitud entre 400nm y 700nm son aquellas que se encuentran en el rango visible y además que se concentra una mayor energía.

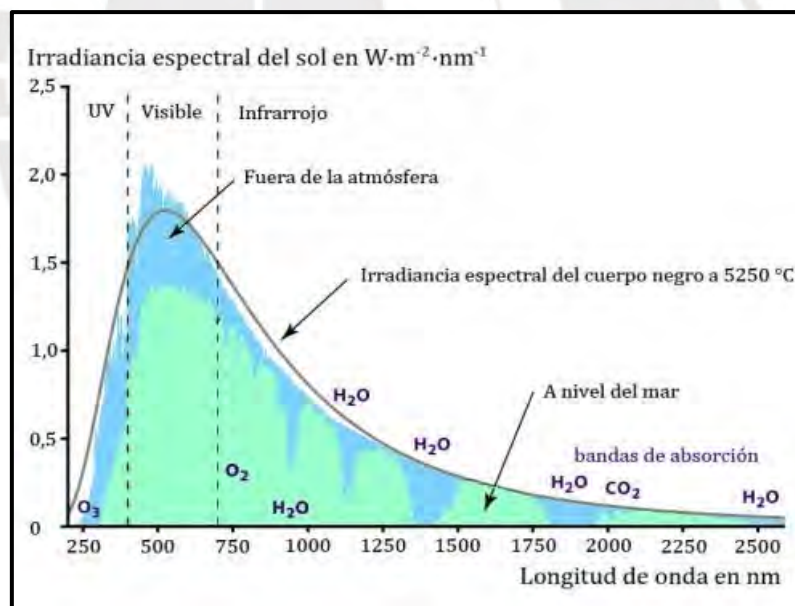


Figura N°13. Espectro de radiación solar [1]

Respecto a la Figura 13, se determina la relación entre la energía de los fotones respecto a su longitud de onda. Por ello, se detalla en las ecuaciones 1 y 2 el nivel de energía asociado a la longitud de onda de cada fotón [1].

$$E_f = h * \nu \quad (1)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

Donde:

- E_f = Energía de un fotón [J]
- ν = Frecuencia asociada a un fotón [Hz]
- h = Constante de Planck ($h=6,626 \times 10^{-19}$ [J.m])
- c = Velocidad de la luz [m/s]
- λ = Longitud de onda asociada a un fotón [m]

Por medio de la ecuación (2) se infiere que la energía que contiene un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda [1]. Así mismo, la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas. Por ello, considerando el concepto de irradiancia que permite medir la radiación que inciden en los objetos expresado en W/m^2 [39]. Podemos relacionar la irradiancia y la longitud de onda de un fotón, tal como se muestra en la de Figura 13, donde se aprecia mayor magnitud de irradiancia respecto a la longitud de onda.

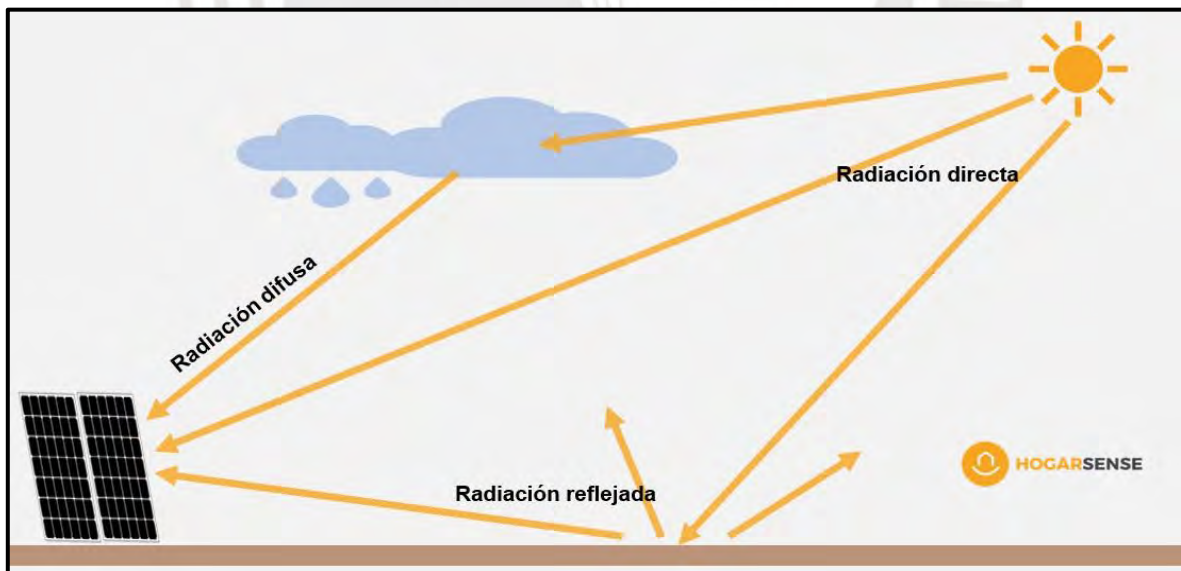


Figura N°14. Trayectoria de la radiación [40]

Por otro lado, en la Figura 14 se aprecia el fenómeno de la radiación incidiendo sobre el panel fotovoltaico. Sin embargo, dicha radiación no incide solo de forma directa. Por ello, en la ecuación (3) especifica la fórmula para determinar la irradiancia total respecto a los tres tipos de radiación en función de la trayectoria de su llegada [40].

$$G_t = G_{Bt} + G_{Dt} + G_{Gt} \quad (3)$$

Donde:

- G_t = Irradiancia Total [W/m^2]
- G_{Bt} = Irradiancia directa [W/m^2]
- G_{Dt} = Irradiancia difusa [W/m^2]
- G_{Gt} = Irradiancia reflejada por la tierra [W/m^2]

2.1.2 Estructura del módulo fotovoltaico

Algunas tecnologías tienen una estructura de sus módulos diferente; sin embargo, la mayoría de tecnologías de celdas fotovoltaicas están constituidas de elementos principales que permiten realizar el efecto fotovoltaico[38]. Además, considerando que el material de las celdas son elementos frágiles y propensos a sufrir corrosión, estos elementos brindan protección ante el medio ambiente o ante golpes de agentes externos[41]. Esta estructura se puede identificar en la Figura 15, donde se muestra los componentes que involucran la estructura del módulo.

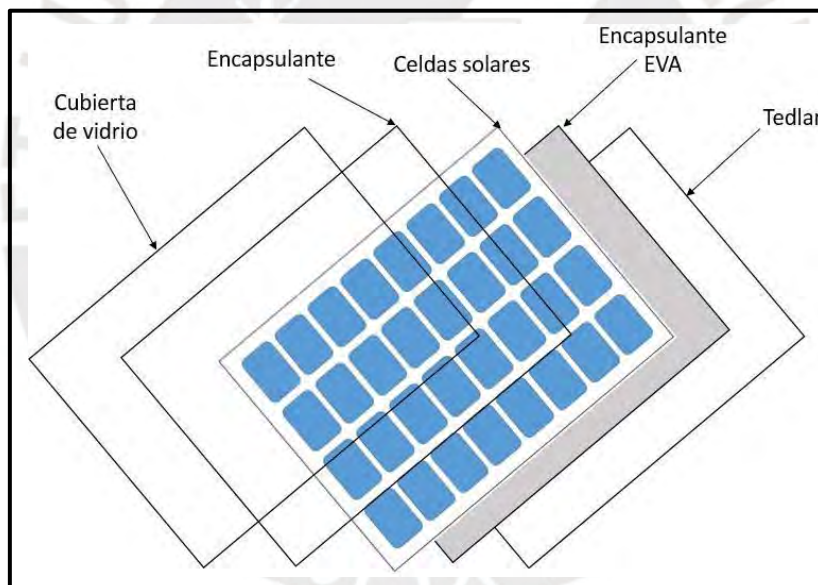


Figura N°15. Estructura de un módulo fotovoltaico [36]

El módulo identificado en la Figura 15, consiste en un panel monocristalino que posee una estructura estándar referente a otras tecnologías [42].

- **Cristal templado**, su función consiste en proteger el interior de las celdas y también como un filtro de radiación. Así mismo, este cristal templado sirve como una capa anti reflexiva.
- **Etileno vinilo acetato (EVA)**, al ser un polímero termoplástico va a permitir encapsular las celdas generadoras para de esta forma evitar el ingreso de aire o humedad.

- **Celdas de Silicio**, el encargado de la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica debido a que sus propiedades semiconductoras que le permiten realizar el efecto fotovoltaico.
- **Tedla**, conocido como PVF o fluoruro de polivinilo, son ubicados en la parte inferior del panel como aislante eléctrico y para proteger respecto a efectos de la radiación ultravioleta
- **Marco de aluminio**, brinda un soporte de rigidez a las capas adjuntas.

La estructura mencionada, permite entender las diferentes capas que está constituido un panel fotovoltaico. Sin embargo, no todas las tecnologías constituyen una misma estructura y ello va a depender del material del semiconductor. Es decir, la estructura indicada es similar a la mayoría de las tecnologías de paneles fotovoltaicos; sin embargo, esta estructura puede variar para paneles con tecnologías emergentes, como se detalla en el inciso 1.1.3.4 el surgimiento de estas tecnologías consiste en tener una mayor captación de ondas electromagnética que por consecuencia los lleva a variar en su estructura externa o en la estructura interna de la celda fotovoltaica.

2.1.3 Circuito eléctrico equivalente

La generación de electricidad de los paneles fotovoltaicos se produce mediante la irradiancia percibida en el área de las celdas. Sin embargo, se requiere de un sistema y conjuntos de elementos que permiten almacenar y distribuir la energía eléctrica. En la siguiente figura, se aprecia el sistema fotovoltaico que está constituido por los siguientes elementos: Un panel fotovoltaico, un arreglo de baterías, un regulador de carga y un inversor [1], [43].

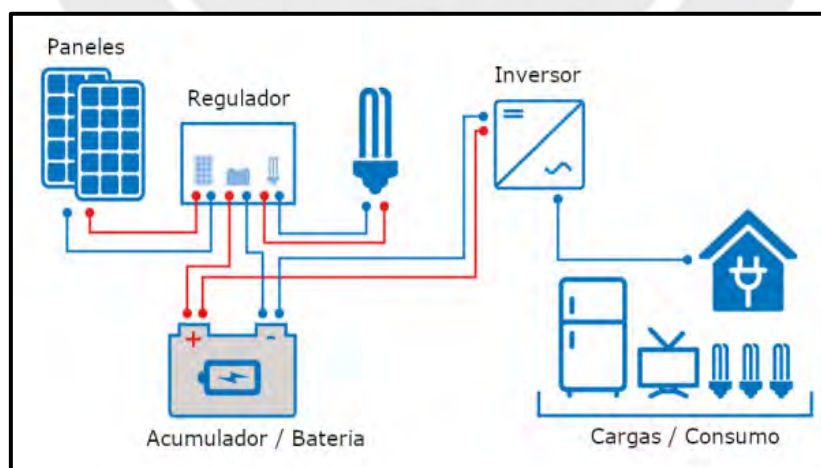


Figura N°16. Esquema general de una instalación fotovoltaica [44]

Una vez entendido el esquema de un sistema fotovoltaico, el cual está constituido de características eléctrica, podemos representar una celda fotovoltaica por un modelo eléctrico. El circuito o modelo que comúnmente se utiliza es el modelo de un diodo debido a la unión p-n de su estructura, el cual se explica en el inciso 1.1.1., dicho modelo se puede visualizar en la Figura 17. El diodo es conectado en paralelo a una fuente de corriente, la cual representa la energía luminosa en contacto con el panel. Además, la resistencia en paralelo representa la corriente de fuga y la resistencia en serie representa la resistencia del panel en el flujo de corriente [42], [45].

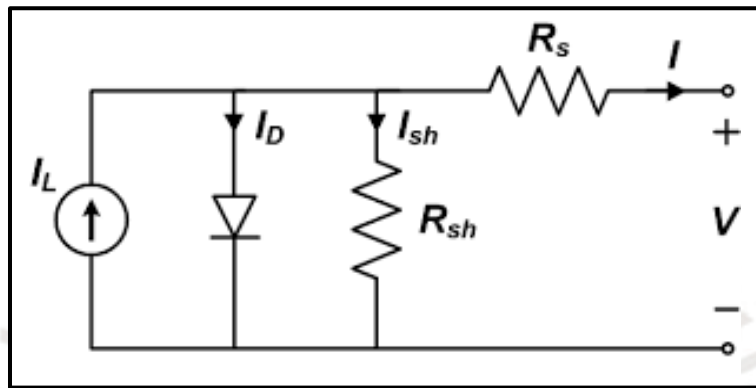


Figura N°17. Circuito equivalente de un panel fotovoltaico[35]

El circuito presentado en la Figura 17, puede ser expresado de manera eléctrica por las siguientes ecuaciones 4 y 5 [41]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\left[\frac{V + IR_s}{a} \right] \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (4)$$

$$a = \frac{nNSKT}{q} \quad (5)$$

Donde:

- I = Corriente producida por el generador fotovoltaico [A]
- I_L = Corriente inducida por la radiación solar [A]
- I_D = Corriente del diodo [A]
- I_{SH} = Corriente que circula por la resistencia en paralelo [A]
- I_0 = Corriente de saturación inversa del diodo [A]
- V = Tensión del generador fotovoltaico [V]
- R_s = Resistencia serie [Ω]
- R_{SH} = Resistencia en paralelo [Ω]
- a = Factor de idealidad modificado

- k = Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} [J/K])
- T = Temperatura de la celda en grados Kelvin [K]
- N_s = Número de celdas conectadas en serie
- q = Carga del electrón (1.602×10^{-19} [C])
- n = Factor de idealidad del diodo (1 para diodos ideales y 2 para reales)

2.1.4 Pasos fundamentales del procesamiento de imágenes digitales

A la manipulación y análisis de imágenes digitales basado en computadora se le designa el nombre de procesamiento de imágenes. Dentro de las ventajas que tiene este procesamiento son la multiplicidad, control bajo parámetros específicos y brinda una alta corrección con una buena reproducibilidad en las imágenes [46]. En el contexto de la tesis se utiliza el procesamiento de imágenes digitales para la extracción de características de una o varias celdas con presencia de distintos defectos que afectan la performance del panel. Para los pasos fundamentales del procesamiento de imágenes representados en la Figura 18, se utilizó las fuentes bibliográficas [47], [48], [49], [50] que permitieron identificar las etapas primordiales para el procesamiento de las imágenes de electroluminiscencia.

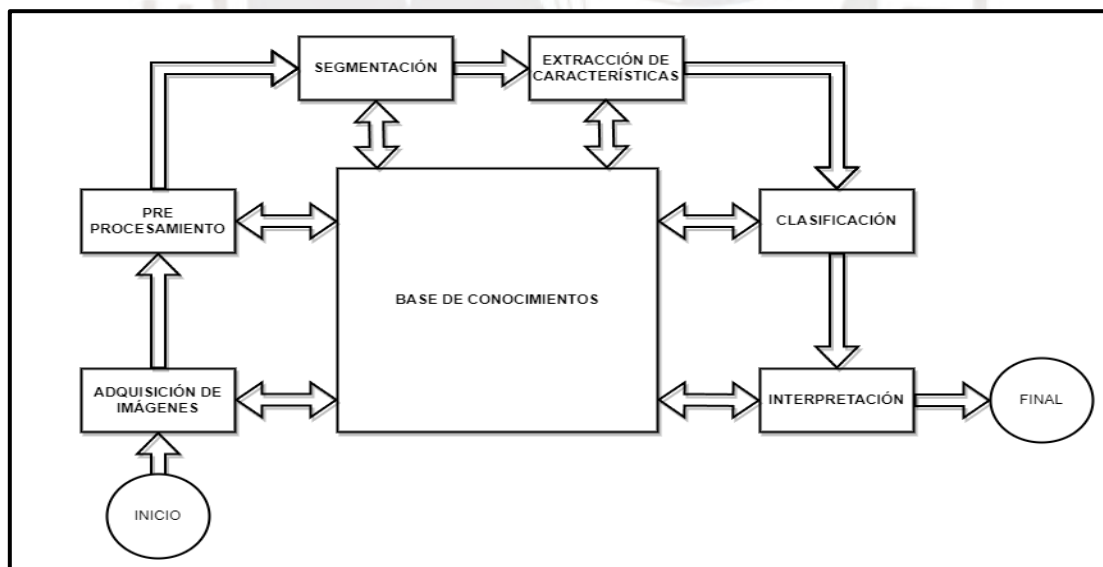


Figura N°18. Etapas fundamentales de procesamiento de imágenes[47]

En base a la Figura 18, se ahonda en los procesos indicados con el objetivo de procesar las imágenes adquiridas por el método electroluminiscencia, el cual se va a detallar:

- **Adquisición de imágenes**

La etapa de adquisición de imágenes consiste en la captura de imágenes mediante dispositivos digitales como cámaras fotográficas que generen una representación digital en píxeles. En el contexto de la tesis, el dispositivo a utilizar para esta etapa es una cámara digital de electroluminiscencia. En el punto 2.3.2 se dará mención de los detalles y especificaciones que debe cumplir la cámara para el proceso de adquisición. En esta etapa es crucial la alta variabilidad de conjuntos de imágenes con el objetivo de generar un conjunto de datos para el algoritmo [48]

- **Preprocesamiento**

Con el objetivo de mejorar la calidad de las imágenes, la etapa de preprocesamiento consiste en mejorar y restaurar la imagen con técnicas como filtros contra ruido, recorte de imagen, la corrección de la distorsión geométrica y mejora del contraste. En primer lugar, la técnica de filtrado consiste en reducir el ruido aleatorio en la imagen, es decir las fluctuaciones de píxeles. Existe distintos filtros como el filtro medio aritmético, filtro medio geométrico, filtro medio armónico y filtro medio contra armónico. En segundo lugar, el recorte de imagen consiste en redimensionar la imagen para limitar la región específica del panel fotovoltaico. En tercer lugar, consiste en técnicas de calibración de cámara para obtener imágenes más precisas del panel. Por último, para mejorar la visualización se utiliza técnicas denominadas transformación de intensidad que abarcan la transformación de inversión, normalización y corrección gamma[50].

- **Segmentación**

El proceso de segmentación es un paso fundamental para el procesamiento de las imágenes de electroluminiscencia, ello debido a que se requiere segmentar las distintas áreas defectuosas de los paneles fotovoltaicos. En el contexto de la tesis, se analizará los segmentos basados en umbrales, en bordes y en regiones con el objetivo de determinar cuál de ellos permite una mayor identificación de los distintos defectos. Los cuales en el punto 2.4 se detallan los defectos más comunes en un panel fotovoltaicos que permitirá segmentar la imagen bajo la identificación de características comunes de los defectos.

- **Extracción de características**

Obtenida el área de una imagen se procede a realizar el siguiente proceso, el cual consiste en extraer la información de la imagen, previamente limitada por características que pueden

abarcando tamaño, colores, texturas, entre otros. Las características indicadas van a distinguir patrones que permitirá su clasificación en el proceso siguiente.

- **Clasificación**

La clasificación de imágenes consiste en la discriminación de objetos respecto a ciertos criterios y características. En el enfoque de la tesis, esta etapa por medio de algoritmos de clasificación va a identificar los diferentes defectos de los paneles fotovoltaicos, dicha clasificación se realiza en base a las características extraídas de las imágenes de electroluminiscencia. Dentro de los tipos de clasificador de imágenes se encuentra el clasificador Navie Bayes, Algoritmo k-vecinos más cercanos, Redes Neuronales Artificiales, árboles de decisión y Máquina de vectores de soporte (SVM). Se requiere realizar experimentos para determinar cuál de todos los clasificadores brinda mejores resultados, pues su elección depende de factores como el objetivo del resultado, calidad y cantidad de datos[48].

- **Interpretación**

Esta etapa final consiste en el análisis de los resultados obtenidos por parte de la clasificación de las imágenes. En base a los objetivos planteados de la tesis, esta etapa de interpretación buscará analizar el impacto de los defectos de los paneles fotovoltaicos respecto a su eficiencia.

2.2 Descripción del sistema de medición de EL

En el punto 1.2.3 se dio mención sobre el concepto de electroluminiscencia, la cual en síntesis consiste en la emisión de luz de un semiconductor por medio de la excitación de una fuente externa. Este concepto aplicado en los paneles fotovoltaicos permite obtener imágenes de electroluminiscencia de los paneles. Sin embargo, se requiere de ciertos criterios para realizarlo.

2.2.1 Esquema funcional

Para la obtención de dichas imágenes constituye el siguiente orden funcional:

- **Primero**, se verifica que la cámara EL se encuentra calibrada e instalada adecuadamente. La cámara debe colocarse perpendicularmente y lo más cerca posible al panel de tal forma que la cámara pueda abarcar toda su área[34]. Además, se considera cubrir la cámara con una tapa opaca para evitar la entrada de luz externa.
- **Segundo**, el panel fotovoltaico es sometido por una fuente externa de corriente que va a ocasionar la excitación de los electrones del material semiconductor que por

consecuencia provocará la emisión de fotones [51]. Se debe considerar que se requiere de una fuente de alimentación eléctrica de CC que sea capaz de aplicar la corriente de corto circuito del módulo “Icc”[34].

- **Tercero**, la cámara EL realiza la detección de los fotones emitidos para ser proyectados en el equipo de cómputo utilizado y poder visualizar los defectos encontrados[35], [51].
- **Cuarto**, las imágenes realizadas al panel fotovoltaicos son transferidas a un equipo de cómputo para ser analizadas[34].

El orden funcional indicado, es un esquema común del sistema de Electroluminiscencia. En la Figura 19, se representa el esquema con los elementos principales que constituyen el sistema. Sin embargo, dependiendo la tecnología de la cámara de EL y la tecnología del panel fotovoltaico las características de los elementos que constituyen el sistema van a variar. Por ello, en el inciso 2.3 se ahonda en las especificaciones del sistema.

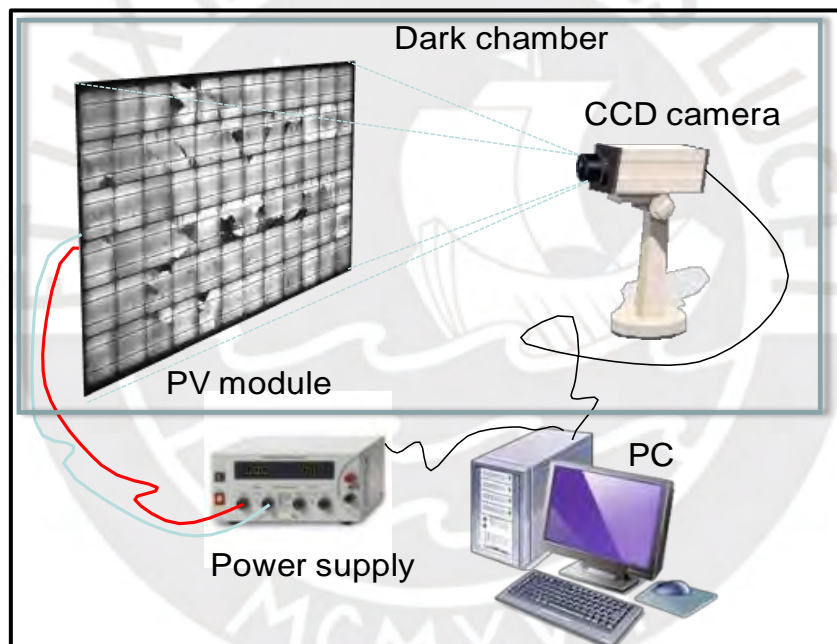


Figura N°19. Estructura del fenómeno de electroluminiscencia[36]

2.2.2 Condiciones ambientales

En el esquema funcional se indica la necesidad de una cámara EL para captar las ondas emitidas, el sensor que utilizan estas cámaras requiere de utilizarse en ambientes oscuros debido a que en el proceso de electroluminiscencia el panel fotovoltaico emite una cantidad baja de radiación comparada a la radiación emitida por fuentes externas como el sol [38]. Al

evitar la radiación de fuentes externas va a permitir que la cámara brinde resultados de imágenes con buena resolución que se pueda visualizar los defectos del panel fotovoltaico.

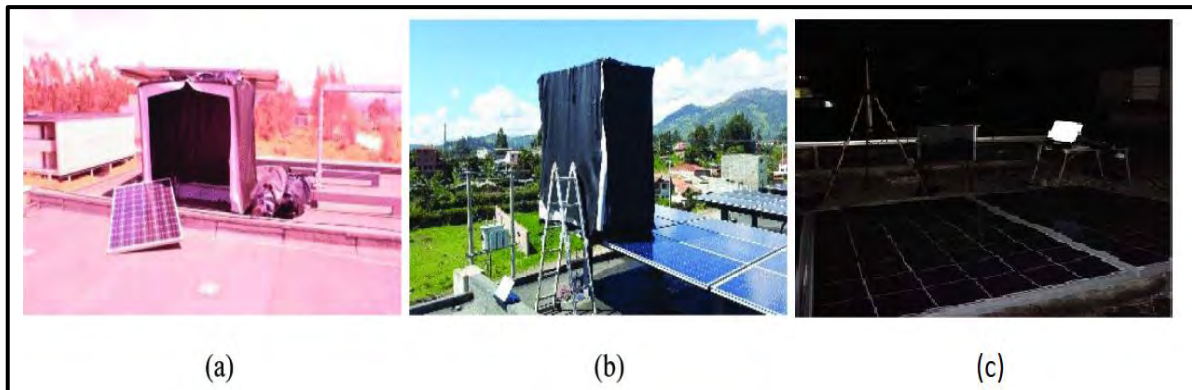


Figura N°20. (a) (b) Estructura de cuarto oscura para imágenes EL[52] (c) Imagen real del set de medición sobre cubierta, para la realización de EL en horario nocturno[37]

En la Figura 20, se presenta en la sección (a) y (b) la estructura de un cuarto oscuro para realizar el proceso de captura de imágenes de EL de los paneles fotovoltaicos instalados en la universidad de Cuenca y por otro lado en la sección (c), el “Set up” utilizado en el proceso de EL en los laboratorios de la Facultad de Física en la Universidad Tecnológica de la Habana. Es usual que la aplicación del método de electroluminiscencia se desarrolle en condiciones nocturnas y ello es debido a que se busca minimizar la interferencia de ondas electromagnéticas producidas por agentes externos, pues para el desarrollo del método se requiere cámaras de Electroluminiscencia las cuales son sensibles a la luz. Así mismo, es necesario tener en cuenta que el proceso de captura de imágenes puede tener ciertos desafíos como el ruido de fondo, el contraste reducido y la saturación de la cámara. Para evitar dichos problemas y obtener una imagen que permita visualizar adecuadamente el defecto de los paneles fotovoltaicos es que se opta por realizarlo en condiciones nocturnas y se debe considerar las especificaciones de la cámara, como se muestra en la Tabla 3 donde se considera la sensibilidad, tiempo de exposición y condiciones de prueba.

2.3 Equipos y materiales para la aplicación de método de EL

Es indispensable conocer las especificaciones y limitaciones de los equipos, herramientas y del software que constituyen el sistema de Electroluminiscencia con el objetivo de facilitar su ejecución y obtener resultados eficientes y precisos.

2.3.1 Instrumentación para la aplicación del método de EL

En base a lo explicado en el punto 2.2.1, donde se brinda un esquema funcional del proceso del método de electroluminiscencia aplicado en paneles fotovoltaicos. Se realiza una tabla

mencionando los instrumentos, accesorios y equipos a utilizar para el proceso de Electroluminiscencia, basándonos en las fuentes bibliográficas [34], [37], [38] se brinda una descripción de cada equipo que constituye el sistema.

Tabla 3. Instrumentación del método de Electroluminiscencia[34], [38].

Equipo	Descripción / Requisitos
Cámara de electroluminiscencia	<p>Una cámara con la capacidad de cubrir el rango de emisión de las diferentes tecnologías de paneles. Dentro de las tecnologías que se utilizan para el proceso suelen ser cámaras con sensor de CCD, CMOS e InGaAs [34] En el mercado existen diferentes tipos de cámara y con diferentes especificaciones, por lo cual se indica los requisitos mínimos de una cámara económica con sensor CDD:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de sensor: CDD • Resolución: <1 megapixel • Sensibilidad: Gama dinámica 2500:1 / Tiempo de exposición >10s • Banda espectral: Si (0.3 -1.1) • Condiciones de prueba: Noche / Oscuro
Fuente de excitación	<p>Consiste en una fuente de alimentación de corriente continua, que permita brindar la suficiente potencia para lograr una corriente de corto circuito I_{sc}, Así mismo, debe tener suministrar voltajes elevados el cual suele ser el voltaje de circuito abierto V_{oc} [34]</p>
Equipo de registro de datos	<p>Dispositivo electrónico que permita guardar los datos obtenidos en las pruebas de electroluminiscencia. Así mismo, se debe cumplir con las especificaciones del software a utilizar, las cuales consisten en una computadora portátil con puerto USB 2.0, conexiones de 100-240 VCA, 50/60 Hz y un sistema operativo Windows 7 o Windows 10.</p>
Instrumentos de medición	<p>Equipos como voltímetros y amperímetros para realizar las mediciones de los valores de voltaje y corriente en el proceso de electroluminiscencia.</p>
Accesorios complementarios	
Soporte/montaje	<p>Consiste en un trípode que permita a la cámara la estabilidad en el proceso de toma de imágenes.</p>
Cables/conductores	<p>Se requiere el uso de cables de alimentación para la fuente y conductores para la sincronización entre la cámara y el software.</p>
Sistema de refrigeración	<p>Producto que el panel se encuentra excitado por una fuente externa, se requiere de controlar su temperatura durante las pruebas.</p>
Instrumentos de medición	<p>Equipos como voltímetros y amperímetros para realizar las mediciones de los valores de voltaje y corriente en el proceso de electroluminiscencia.</p>
Equipos de protección personal	<p>La seguridad del personal que va a realizar instrumentación de los equipos debe contemplar guantes, botas de seguridad, gafas de seguridad y los EPP adecuados para realizar las pruebas de electroluminiscencia.</p>
Equipo de limpieza	<p>Accesorios y herramientas necesarias para la limpieza del ambiente donde se desarrollará las pruebas.</p>

2.3.2 Cámara de Electroluminiscencia

Como se detalló en el esquema funcional del proceso de electroluminiscencia, es fundamental el uso de una cámara que tenga las especificaciones necesarias que permita capturar el espectro de luz específico para cada tecnología[41]. El rango de espectro de emisión que puede capturar, es una especificación esencial para los sistemas de cámara EL [34]. En la Figura 21, se puede apreciar el espectro de emisión de algunas tecnologías de paneles fotovoltaicos, como ejemplo de ello se aprecia que el pico de emisión de un módulo solar de silicio cristalino es 1150nm, el cual es similar al módulo solar de CIGS. Sin embargo, los paneles fotovoltaicos que están constituido de CdTe, tienen un pico de emisión menor de 830nm. Por ello, en algunas tecnologías de paneles fotovoltaicos el rango de emisión varía y las cámaras de EL necesitan tener una eficiencia cuántica que permita detectar los electrones.

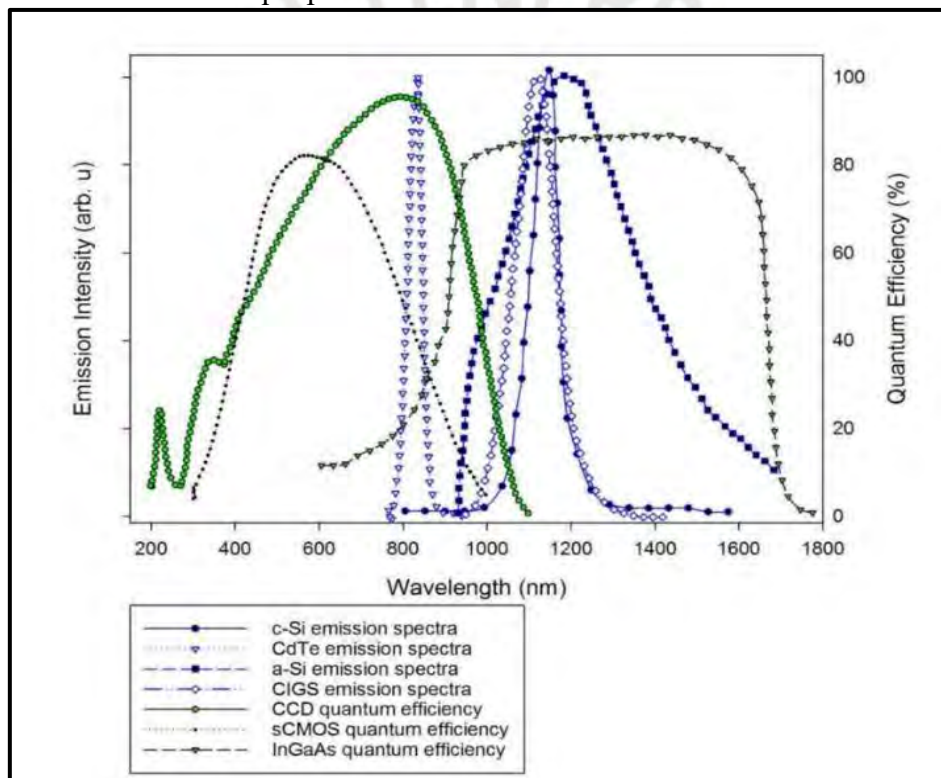


Figura N°21. Espectro de emisión c-Si, Cdte, a-Si, CIGS [34]

Además, en la misma figura se puede apreciar el rango de captura de algunas tecnologías de cámaras EL cómo las cámaras con sensores CCD, CMOS y InGaAs. La diferencia entre estos sensores varía respecto a la tecnología que utilizan para convertir la luz en electrones, su eficiencia cuántica, el rango espectral de emisión de captura, resolución, tamaño de píxel y el tiempo de exposición [38], [53]. En el mercado existen una variedad de modelos que cumplen con las especificaciones mínimas para realizar el método de electroluminiscencia, por ello en

la Tabla 4 obtenida por el informe AIE-PVPS T13-10:2018 [34] se nombra ejemplos de modelos de cámaras.

Tabla 4. Lista de ejemplo de cámaras para el método de Electroluminiscencia [34]

Fabricante	Modelo	Tipo de Cámara	Tipo de Sensor	Resolución	Tipo de enfriamiento	Tamaño (mm)	Peso
Andor	DU491A	Linescan	InGaAs CMOS	1024	Thermoelectric	155x101x100	2kg
Hamamatsu	C10633-13	Area	InGaAs CMOS	320x256	None	50x50x50	0.23kg
Hamamatsu	C12741-11	Area	InGaAs CMOS	640x512	Thermoelectric w/forced wáter	189x108x110	3.4kg
NPC group	EPTiF	Area	InGaAs CMOS	320X256	-	-	-
Andor	Clara Interline CCD Series	Area	Si CCD	1392x1024	Thermoelectric	127x112x96	2.2kg
Andor	PV Inspector	Area	Si CCD	1024x1024	Thermoelectric	208x105x64	2.2kg
Camels	MT-EL-H1709M	Area	Si CCD	1392x1040	Thermoelectric w/forced air	730x465x465	150kg
Camels	MT-EL-H1708M	Area	Si CCD	1392x1040	Thermoelectric w/forced air	Custom	
Greateyes	LumiSolarOutdoor	Area	Si CCD	2048x2048	-	-	40kg
Andor	Zyla 4.2 PLUS	Area	Si CMOS	2048x2048	Air or wáter cooled	133x82x80	1kg
Sony	Raspberry Pi NoIR Camera	Area	Si CMOS	3296x2512	None	25x23x9	0.003kg

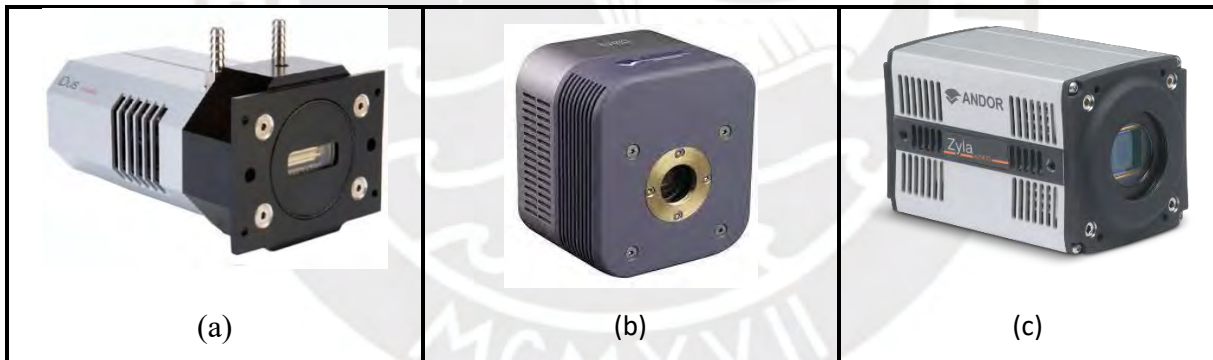


Figura N°22. (a) DU491A InGaAs Spectroscopy CCD[54] (b) Clara Interline CCD[55] (c) Zyla 4.2 CMOS[56]

2.3.2.1 Sensor CCD

La eficiencia cuántica que tienen los sensores CCD, revolucionó la fotografía pues tienen la capacidad de detectar entre el 50% y 90% de fotones que inciden sobre ellos y un rango espectral de captura entre 350nm y 1000nm. Esta tecnología consiste en circuitos que leen y almacenan electrónicamente las imágenes que se proyectan sobre ella. Su fabricación está constituida principalmente de silicio, el InGaAs, o el InSb, el cual es el material semiconductor que permite el fenómeno físico del efecto fotoeléctrico [35] Así mismo, su principio de funcionamiento consiste en que todos los píxeles se leen a través de una salida A/D (

convertidor análogo- digital) pero conforme aumenta la velocidad de fotograma, el ruido de lectura aumenta.

2.3.2.2 Sensor CMOS

El rango espectral que tiene las cámaras con sensor CMOS es de 400nm y 1000nm con una eficiencia cuántica entre 50 a 70%, cuyos valores se aproximan a una cámara con sensor CCD. Sin embargo, la diferencia del sensor CMOS respecto al CCD consiste en su tecnología para convertir la luz en electrones. Su principio de funcionamiento consiste en que cada pixel se puede leer simultáneamente debido a que cada uno tiene un convertidor A/D [41], [57].

2.3.2.3 Sensor InGaAs

El sensor de InGaAs, permite la captura de imágenes en un rango de emisión entre 600nm y 1800nm. Ello le permite abarcar un rango mayor de espectro de emisión de los paneles fotovoltaicos. Ello se puede comprobar respecto a la Figura 21, donde la curva de sensibilidad superpone la curva de material de Silicio. Ello va a permitir poder obtener imágenes de electroluminiscencia de alta calidad donde se identifiquen los defectos. Sin embargo, su costo se incrementa y su resolución disminuye [35], [38]. Por ello, en la siguiente tabla se brinda una comparación cualitativa que permite identificar los beneficios del uso de cámaras con sensor InGaAs pero considerando el factor económico.

Tabla 5. Comparación de las características técnicas y cualitativas entre tipos de sensores para cámaras de EL[53]

Características	Cámaras CCD	Cámaras CMOS	Cámaras con sensor InGaAs
Rango Espectral	350nm – 1000nm	400nm – 1000nm	400nm – 1700nm
Eficiencia cuántica	50 – 90%	50 – 70%	70 – 90%
Tamaño de Pixel	4.54 μm	5.5 μm	15 – 30 μm
Sensibilidad a la luz	Moderado	Alta	Alta
Resolución	Alta, hasta 9MP	Alta, hasta 4MP	Bajo, menor a 0.32MP
Tiempo de exposición	Muy largo, 1ms a horas	Largo, 1 ms a segundos	Muy corto, 500ns a segundos
Cuadro por segundo	6Hz	50Hz	346Hz
Aplicaciones principales	Electroluminiscencia	Electroluminiscencia	Electroluminiscencia
Costo	Moderado	Moderado a alto	Alto
Condiciones de iluminación	Adecuado para luz moderada	Adecuado para luz baja	Adecuado para luz infrarroja

2.3.3 Software para cámara de Electroluminiscencia

Una vez identificado las tecnologías de las cámaras, se procede a analizar el software para el proceso de electroluminiscencia. Por ello, se debe considerar para la elección del software las especificaciones de fabricación y modelo de la cámara porque debe ser compatible con la

tecnología de la cámara para el proceso de adquisición de imagen. Usualmente, los proveedores de las cámaras para electroluminiscencia incluyen el software para el procesamiento de las imágenes, pero no son de acceso libre. Sin embargo, se puede utilizar software de procesamiento de imágenes alternativos como Matlab, ImageJ y Python.

- Greateyes LumiSolarOutdoor 9.0: Consiste en un Software para la cámara de electroluminiscencia de tecnología CCD de su mismo nombre, el software viene incluido con el sistema de medición de electroluminiscencia. Por ello, el software puede controlar la captura de imagen y la alimentación de la fuente de poder. En la Figura 23 se aprecia la interfaz de usuario donde se visualiza los resultados [58].

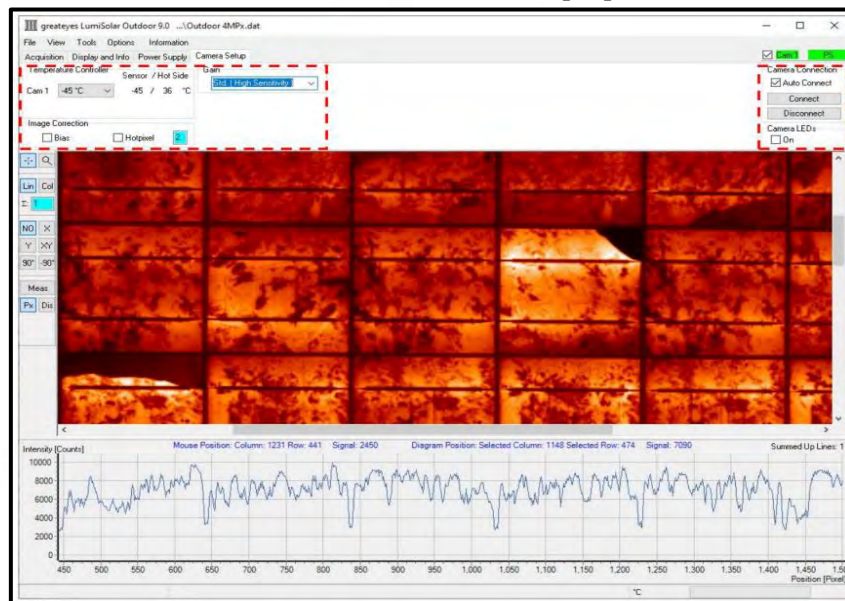


Figura N°23. Software Greateyes LumiSolar Outdoor 9.0 [58]

- PCO CAMWARE: Es un software para cámaras con sensor CCD que permite controlar parámetros y modificar propiedades de captura de la imagen [35]. Este Software viene incluido con la cámara y la ventaja de dicho software que puede ser descargado desde su plataforma, pero es compatible solo con cámara PCO.

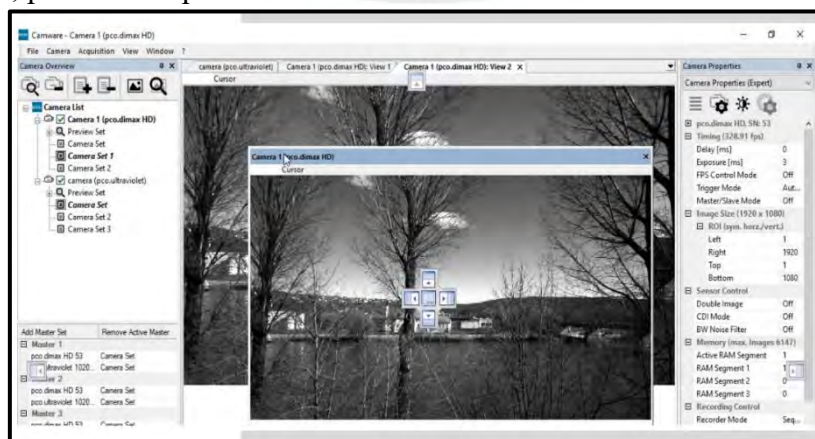


Figura N°24. Software PCO CAMWARE [59]

2.4 Tipos de defectos

Las plantas de energía fotovoltaica en los últimos 10 años se han instalado con mayor cantidad y en algunos casos a los pocos años de su instalación surgieron una disminución de su capacidad, producto de algún defecto del panel [60]. Por ello, es importante identificar los defectos para mejorar la optimización del sistema fotovoltaico, pues existen defectos que no se pueden identificar mediante una inspección visual. Por ello, el uso del método de electroluminiscencia permite identificar defectos con una mayor calidad respecto a otras técnicas. En la Figura 25, se presenta los resultados obtenidos de la aplicación de la electroluminiscencia en el laboratorio de la sección de física de la Universidad de la Habana, donde se realiza un análisis cualitativo de defectos encontrados en los paneles fotovoltaicos.

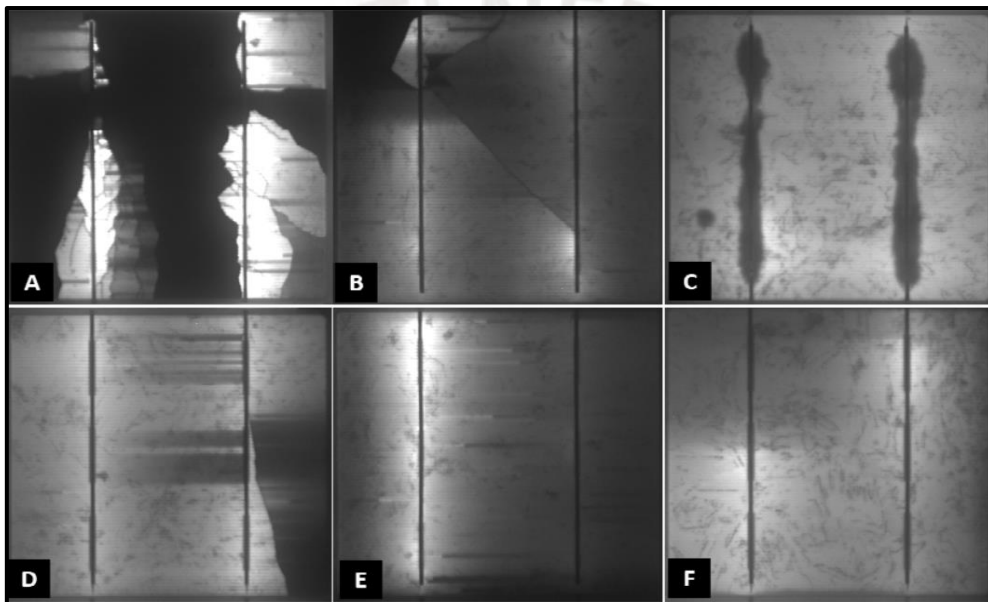


Figura N°25. Clasificación de defectos de una imagen de EL [37]

2.4.1 Grietas en celdas

Un defecto común en los paneles fotovoltaicos es el agrietamiento de la capa protectora del panel o de las celdas que constituyen este mismo. Las celdas de silicio tienen un espesor de $200\ \mu\text{m}$ [36], lo que ocasiona que sean frágiles ante movimientos bruscos como su traslado o su montaje. Así mismo, su fragilidad ocasiona que sea vulnerable ante cambios de temperatura repentinos, pues en promedio la temperatura de una celda en un día soleado puede abarcar entre los $80 - 120^\circ\text{C}$ y el cambio repentino a una temperatura mucho menor de los 30°C , llevaría a una tensión térmica en la celda ocasionando micro fisuras o fracturas que traería como consecuencia disminución de la capacidad del panel [60]. En la sección A y B de la Figura 25, se aprecian roturas y microfracturas en las celdas del panel fotovoltaicos respectivamente.

2.4.2 Humedad de paneles fotovoltaicos

Los paneles se encuentran expuestos ante cualquier cambio de clima y también ante la humedad que genera la lluvia, la nieve o la brisa de mar. Por ello, los fabricantes dentro de las especificaciones del panel deben incluir el grado de protección IP65 y así evitar la transición de la humedad entre las capas[60]. Caso contrario, la humedad va a influir en los parámetros de operación, como es el estado del aislamiento R_{iso} , y también va a generar corrosión en zonas donde exista delaminación o separación de la capa superior.[36], [37], [60]. En la sección E de la Figura 25, se visualiza el defecto de la corrosión en las barras colectoras de una celda fotovoltaica. Así mismo, en la Figura 26 se observa las consecuencias de la humedad en la lámina protectora del panel trasero después de 8 años de funcionamiento[60]



Figura N°26. Lámina protectora del panel trasero agrietada después de ocho años de funcionamiento[37], [60]

2.4.3 Degradación inducida por potencial (PID)

El defecto PID en los paneles fotovoltaicos no es detectado mediante una inspección visual, se requiere de técnicas como la termografía o la electroluminiscencia para identificar la degradación ocasionado por dicho defecto antes que influya considerablemente en la eficiencia del sistema [60]. La degradación inducida por potencial es producto de las fugas de corriente que conlleva a la pérdida de potencia en los paneles fotovoltaicos. Este fenómeno consiste en la diferencia de potencial que existe entre el marco del módulo, el cual está conectado a tierra, y las celdas del panel, las cuales están conectadas en serie y sometidas a un alto potencial. Producto de dicha diferencia de potencial ocasiona que parte de los electrones liberados por el efecto fotovoltaico fluyan en dirección a tierra[36], [60], [61].

2.4.4 Pérdida de continuidad y cortocircuitos

Como se indicó en el punto 1.1.1, los paneles fotovoltaicos están constituido de celdas fotovoltaicas, las cuales son ensambladas e interconectadas entre sí para constituir un panel. Su conexión se realiza mediante circuitos impresos soldados, los cuales se encuentran en la parte posterior e inferior del panel [60]. Sin embargo, estos puntos de soldadura suelen presentar defectos producto de su mala calidad o de las altas tensiones que soportan las celdas [36]. Este defecto se puede apreciar en la sección D de la Figura 25, donde en la imagen de EL se aprecia fallas en los contactos metálicos producto del defecto de los puntos de soldadura. Por otro lado, en la Figura 27, se aprecia un punto metálico quemado de un panel.

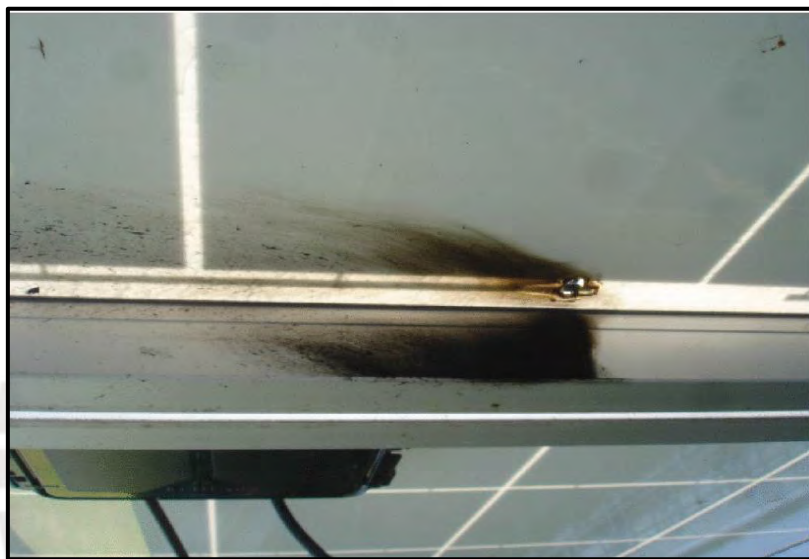


Figura N°27. Ejemplo de punto de soldadura quemado [37], [60]

Los defectos nombrados son los más comunes en el análisis de las imágenes de electroluminiscencia, ello va a permitir realizar una comparación de los defectos físicos en los paneles fotovoltaicos con los defectos que se visualizan en las imágenes de electroluminiscencia para luego realizar un análisis cualitativo. Además, la identificación de los defectos en las imágenes de Electroluminiscencia permitirá la clasificación cualitativa que se realizará previo al entrenamiento de una red neuronal. Por ello, se plantea el inciso 2.5.1 para realizar el proceso de clasificación de defectos.

2.5 Método de análisis de datos

Como se mencionó en el punto 1.2.3, la técnica de electroluminiscencia permite evaluar la integridad de una celda fotovoltaica debido a su sensibilidad a los defectos internos. Con la imagen obtenida, se puede detectar los defectos mediante comparación visual, pero se requiere de un procesamiento de imágenes para cuantificar el impacto de los defectos en los paneles.

2.5.1 Análisis cualitativo

Dicho análisis consiste en brindar una información de características y patrones identificados mediante una inspección visual y comparando mediante otros enfoques, por ello se plantea el proceso detallado en la Figura 28 que se realizará a las imágenes de Electroluminiscencia.



Figura N°28. Proceso de análisis cualitativo a imágenes de Electroluminiscencia

- **Adquisición:** Este primer proceso consiste en los resultados obtenidos mediante el software de la cámara de electroluminiscencia utilizada, en donde se tendrá imágenes con buena calidad y resolución en base a las especificaciones de los equipos.
- **Visualización:** Las imágenes obtenidas en el proceso anterior, deben ser visualizadas mediante un software de visualización de imágenes donde permita ajustar parámetros como el brillo, contraste, tamaño, etc.
- **Identificar características:** Este proceso consiste en la búsqueda de patrones o características en las imágenes. En general, las imágenes de electroluminiscencia con defectos presentan áreas de color negro, regiones oscuras y formas que representa grietas en las celdas.
- **Comparación con otros resultados:** En el índice 2.4 se identifican los defectos presentes en las imágenes de electroluminiscencia, los cuales son identificados en la imagen y comparados con el defecto físico en el panel. Mediante esa forma se identifican similitudes o diferencia entre defectos.
- **Interpretación:** Este último proceso consiste en la interpretación de los procesos anteriores. Se brinda una hipótesis para los patrones identificados. Un ejemplo de los resultados obtenidos del proceso planteado se puede visualizar en las Figuras 12 y 25.

El proceso planteado permitirá en el inciso 3.2 la selección de imágenes de electroluminiscencia de manera cualitativa para posterior a ello realizar el entrenamiento de una nueva red neuronal.

2.5.2 Análisis cuantitativo

El objetivo de un análisis cuantitativo respecto a los paneles fotovoltaicos consiste en cuantificar aspectos relacionados a la eficiencia, defectos, pérdidas y rendimiento. En el contexto con la tesis, se busca obtener dichos valores cuantificados por medio del procesamiento de las imágenes obtenidas por la técnica de electroluminiscencia. En la bibliografía encontrada se indica distintos análisis cuantitativos obtenidos por medio del procesamiento de imágenes. La fuente bibliográfica [48], tiene como objetivo predecir si el defecto en el panel fotovoltaico es ocasionado por degradación inducida por potencial (PID), esta predicción lo realiza mediante el procesamiento de imágenes. Para dicho procesamiento, utilizó un clasificador kNN que le permitió identificar el defecto PID mediante el análisis de las imágenes de electroluminiscencia. El resultado obtenido consistió en un 89% de precisión para clasificación de las fallas mediante el algoritmo propuesto. Por otro lado, en la fuente bibliográfica [49] se presenta distintos clasificadores para el procesamiento de imágenes de electroluminiscencia en donde se obtiene el porcentaje de precisión de detección de fallas respecto a cada clasificador usado. En la Figura 29, se presenta los resultados del procesamiento de imágenes mediante el clasificador SVM, el cual le permite obtener un porcentaje de 97,5% de detección de defectos. Se concluye en dicha tesis, que el clasificador SVM permite una clasificación con un porcentaje eficiente. Sin embargo, se debe evaluar la calidad de las imágenes de electroluminiscencia y los recursos computacionales utilizados en el entrenamiento de la red.

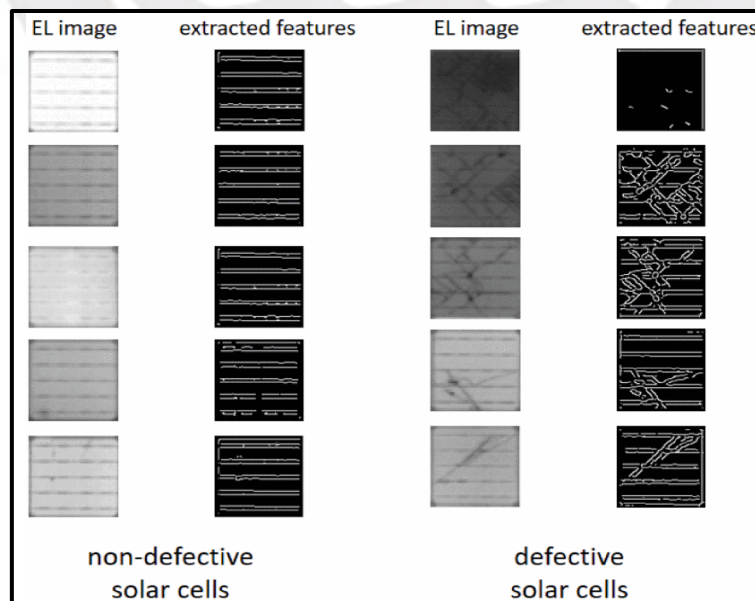


Figura N°29. Resultados experimentales [49]

Por otro lado, la fuente bibliográfica [36] se basa en la modelación de un arreglo de paneles fotovoltaicos a través de PSIM, en el cual se realizan modificaciones para modelar los efectos más comunes en los paneles y el impacto ocasionado respecto a su eficiencia. Así mismo, se detalla el desarrollo de un software en LabVIEW que busca identificar los defectos de los paneles. Llegando a la conclusión que pueden obtener los resultados del impacto que ocasiona los defectos en los paneles fotovoltaicos por medio de simulación.

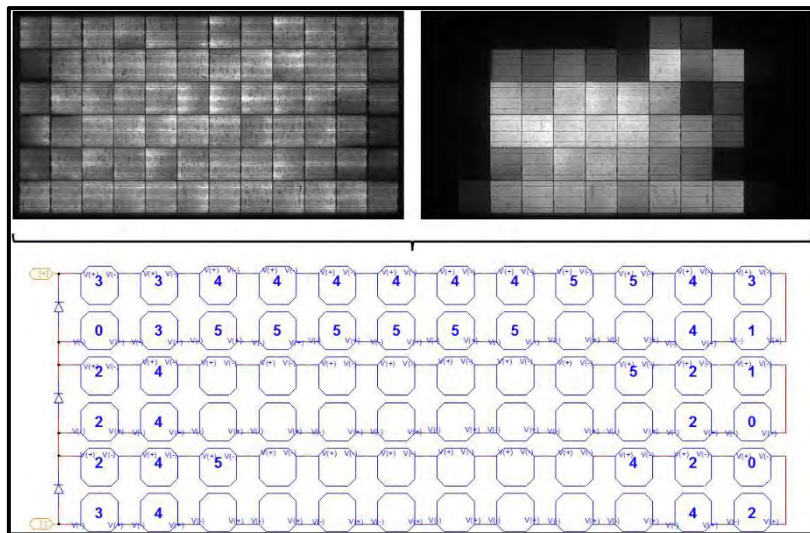


Figura N°30. Agrupación de celdas en función de su degradación por PID [36]

En el proceso de búsqueda de fuentes bibliográficas, un gran porcentaje de estas fuentes solo brindaban un análisis cualitativo. Por ello se evidenció la falta de información respecto a un análisis cuantitativo que permita la correlación entre los defectos detectados por medio de un procesamiento de imágenes y el impacto que genera este defecto en la performance de un panel fotovoltaico. Las fuentes bibliográficas presentadas servirán como punto de partida para el cumplimiento de los objetivos definidos en la tesis.

CAPÍTULO 3: ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE ELECTROLUMINISCENCIA Y DESARROLLO DEL PROCESAMIENTO

En el proceso experimental de la tesis, se ha requerido de un conjunto de equipos, herramientas, accesorios y software que permitieron que las imágenes obtenidas puedan ser procesadas para llevar a cabo un análisis cualitativo y cuantitativo. La adquisición de las imágenes de electroluminiscencia se desarrolló en la facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

3.1 Especificaciones técnicas del arreglo utilizado

Los equipos utilizados requieren cumplir con ciertos detalles técnicos que permitan el desarrollo de la adquisición de imágenes de electroluminiscencia sin dañar los paneles fotovoltaicos o los equipos que constituyen el sistema de electroluminiscencia.

3.1.1 Detalles técnicos de los paneles fotovoltaicos estudiados

Los paneles fotovoltaicos a estudiar son aquellos que se encuentran instalados en la azotea de la facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú, las cuales abarcan las tecnologías de emisor pasivado y celda trasera (PERC), heterounión con celda de capa fina intrínseca (HIT) y seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), tal como se puede apreciar en la Figura N°31. Así mismo, el laboratorio de materiales de la facultad mencionada cuenta con paneles de reserva y paneles dañados que se encuentran almacenados para ser analizados.



Figura N°31. Paneles fotovoltaicos instalados en la azotea de la Facultad de Física - PUCP

Cada panel fotovoltaico, independiente de su tecnología, cuenta con características y especificaciones técnicas facilitadas por el fabricante que, en el contexto de la tesis, van a determinar valores límites para la excitación de los paneles en el proceso de captura de la imagen de electroluminiscencia. En la Tabla N°6, se indica las descripciones de los paneles fotovoltaicos a los cuales se le realizó la excitación por medio de la fuente externa.

Tabla 6. Detalles técnicos de paneles fotovoltaicos [62], [63], [64].

Descripción	VBHN330SJ53 (HIT)	CS1H-335MS (PERC)	CdF- 1150A1(CIGS)
Pmax	330 W	335 W	115 W
Vmpp	58.0 V	37.4 V	57.4 V
Impp	5.70 A	8.96 A	2.00 A
Voc	69.7 V	44.3 V	75.5 V
Isc	6.07 A	9.72 A	2.21 A
Vsys	1,000 V	1,000 V	1,000 V
Peso	19 Kg	19.2 Kg	12.9 Kg

Las especificaciones de cada panel fotovoltaico es información indispensable para el proceso de captación de las imágenes. Al momento de excitar el panel, no se debe exceder los valores límites de corriente de corto circuito (I_{sc}) y de tensión de circuito abierto (V_{oc}) que tienen los paneles. Dichos valores deben ser cerciorados en el etiquetado presente en la parte trasera del panel antes de realizar el paso experimental o en la ficha técnica del panel. Una vez identificado dichos valores, se procede a iniciar con el proceso experimental ubicando el panel perpendicular al suelo del laboratorio e identificando la polaridad de sus terminales que luego serán conectados a la batería externa.

3.1.2 Detalles técnicos del sistema de electroluminiscencia

Para el desarrollo e investigación de la tesis, la facultad de Física en conjunto con el grupo MatER-PUCP facilitó el sistema de medición de electroluminiscencia llamado “*LumiSolarOutdoor*” de la empresa berlinesa “*Greateyes*”. El sistema está constituido de todos los equipos electrónicos como la batería externa, la cámara de electroluminiscencia y el

ordenador. Además, incluye las herramientas, software y accesorios necesarios para la captura de las imágenes.



Figura N°32. Sistema de medición de electroluminiscencia [58]

3.1.2.1 Detalles técnicos de fuente de la alimentación externa

La fuente de alimentación externa que excita al panel fotovoltaico, requiere de detalles técnicos para una adecuada carga y también los límites máximos de voltaje y corriente para la salida de excitación al panel fotovoltaico. Dichos requerimientos se detallan en la Tabla N° 7.

Tabla 7. Detalles técnicos de Batería “LumisSolarOutdoor”[58]

Alimentación Eléctrica	
Nivel de Voltaje	100 – 240 Vac
Frecuencia	50 – 60 Hz
Nivel de corriente	10 A
Fase	Monofásico
Normativa	IEC 60038
Salida de excitación a Panel Fotovoltaico	
Rango de Voltaje	0 – 9.5 A
Rango de corriente	0 – 100Vcc

En la Figura 33, se presenta la batería del sistema junto a la interfaz que permite la conexión entre la cámara, la laptop y el panel. El proceso de la captura de imagen es regido por el software del sistema, el cual se encarga de sincronizar los segundos de captura de la cámara y en paralelo la excitación al panel fotovoltaico. Por otro lado, el proceso de carga de la batería se puede establecer en 3 pasos como se puede apreciar en la Figura 33(b) del lado derecho.

Paso 1, conectar la batería a un enchufe de 100 – 240 V ac, identificar que el cable esté conectado en la zona indicada como “AC Input”. Paso 2, si requiere monitorear el proceso de carga, puede presionar el botón “ON” que se encuentra en la zona denominada como “Remote control invertir/Charger”. Por último, el paso 3 consiste en visualizar el proceso de carga en la pantalla. El proceso de carga dura aproximadamente entre 4 a 5 horas y cuando alcance un valor de voltaje menor a 10,5V se apagará automáticamente[58]. Una vez la batería se encuentre cargada, el siguiente paso experimental consiste en identificar los bloques de “Camara, Laptop” y “Power Output” ubicados en la interfaz de la batería, pues serán los lugares donde se conectarán los cables para la sincronización.

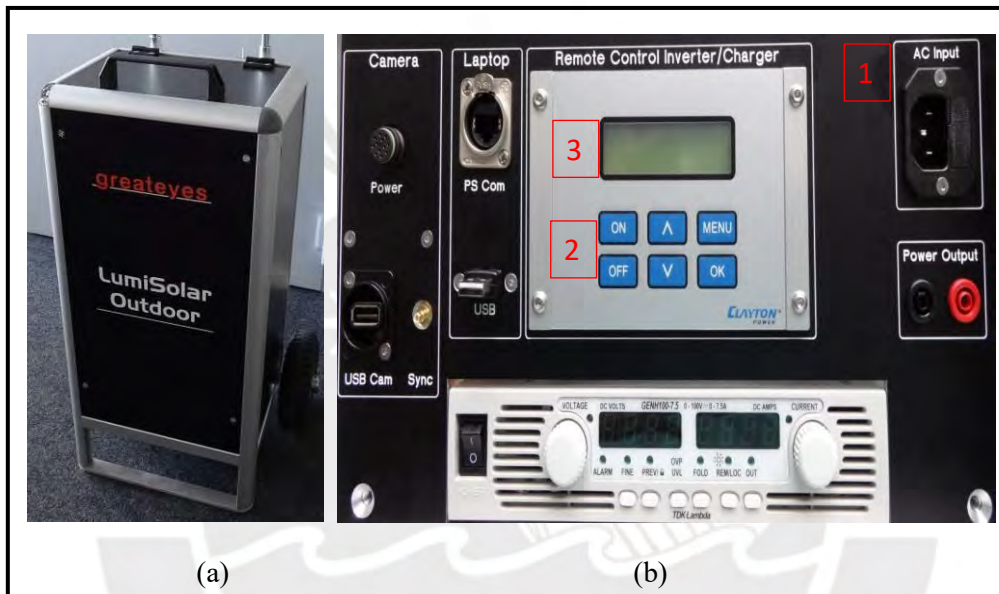


Figura N°33. (a)Batería del Sistema de medición de electroluminiscencia. (b)Interfaz de la batería [58]

3.1.2.2 Detalles técnicos de la cámara

En la tabla N°4, se detalla las diferentes opciones de cámaras de electroluminiscencia en base a su tecnología y sus características que cumplen con el objetivo de capturar imágenes de electroluminiscencia de alta calidad para realizar el análisis visual. Dentro de ellas, se encuentra la cámara “LumiSolar Outdoor”, la cual fue adquirida por la facultad de física para el estudio de los paneles fotovoltaicos. En la Tabla N°8 se indican los detalles técnicos de la cámara utilizada en el proceso de captura de las imágenes de electroluminiscencia, los cuales permite capturar las ondas electromagnéticas de las tecnologías de los paneles existentes en la facultad.

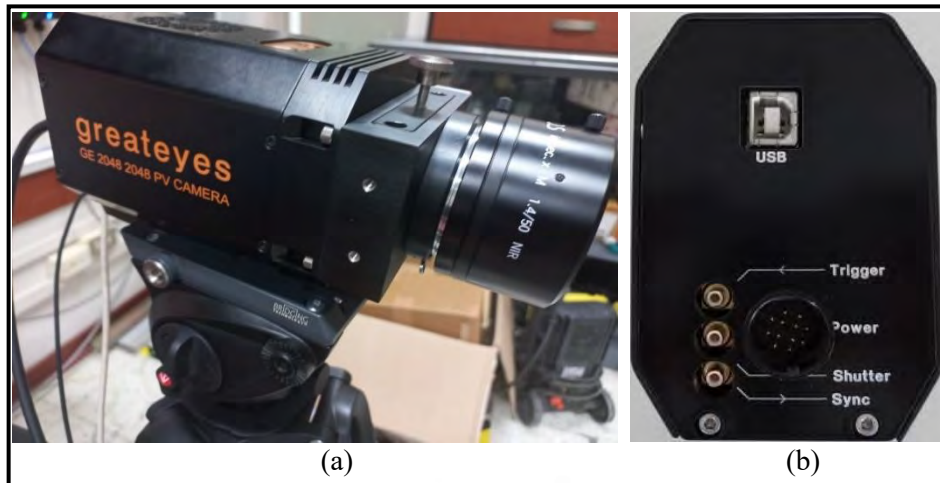


Figura N°34. (a)Cámara “LumiSolar Outdoor”. (b)Terminales de conexión [50].

Tabla 8. Detalles técnicos de la Cámara “LumiSolar Outdoor”.

Detalles técnicos de Cámara	
Formato de sensor	2048 x 2048 píxeles
Tamaño de pixel	13,5 um x 13,5 um
Frecuencia de lectura de píxeles	16 bit
Gama dinámica	BK7
Vidrio de ventana	En
Monitoreo de temperatura	Sensor CCD
Enlace de datos	USB 2.0
Interfaces TTL	1 x <i>Trigger IN</i> , <i>Sync OUT</i> , <i>Shutter OUT</i>

Así mismo, la cámara mencionada tiene la ventaja de utilizar distintos filtros debido a que el rango de emisión de ondas electromagnéticas va a variar respecto a la tecnología de panel fotovoltaico. Los filtros incluidos en el sistema son de tipo paso alto, fabricados por la empresa Edmund Optics y abarcan los valores de 1000 nm, 900 nm y 725 nm, que serán utilizado en base a la tecnología del panel [65], [66]. Por ello, en base a la tecnología del panel fotovoltaico a estudiar, el filtro será cambiado para así cambiar el rango de captura de las ondas electromagnéticas. Teniendo en cuenta los detalles técnicos de la cámara, el paso experimental siguiente consiste en instalar la cámara junto al trípode a una distancia aproximada de 2.5 metros e identificar los terminales a conectar para la sincronización, pues la cámara será controlada por el software y sincronizada junto a la batería para capturar las ondas electromagnéticas en el tiempo establecido en el software. Los terminales denominados *USB*, *Power* y *Sync* deben ser identificados en la cámara como se muestra en la Figura N°34.

3.1.2.3 Periféricos y accesorios requeridos en el montaje experimental

El sistema de medición de electroluminiscencia abarca accesorios que permiten la conexión y sincronización entre la cámara, la batería y el software para la obtención de las imágenes.

Tabla 9. Accesorios complementarios del Sistema “LumiSolar Outdoor” [58]

Accesorios y Periféricos

Cable de Alimentación del módulo fotovoltaico (Cable dúo rojo y negro conectores MC4)



Conductor de cable de cámara con cable de alimentación, cable USB y cable de sincronización



Conducto de cable para computadora portátil con cable de datos y cable USB



Cable de alimentación IEC



Portátil para exteriores



Trípode Estándar



Conectores de módulos solares



Barra en T para trípode con cabezal giratorio pre montado



Herramienta MC4



En la Tabla N°9, se indican los equipos, herramientas y accesorios complementarios que constituyen todo el sistema de medición requerido para el montaje experimental. Todos estos equipos son indispensables para las conexiones de los periféricos tanto del panel como el de la cámara. Por ello, en la adquisición del sistema se incluyó todos los equipos indicados en la tabla y los cuales pueden certificarse en el manual de instrucciones. Como siguiente paso experimental, se debe identificar los cables y conductos del sistema. Teniendo en cuenta los terminales identificados previamente de la cámara y el panel, se procede a conectar los cables correspondientes a sus terminales. Luego, se identifica los terminales ubicados en los bloques de “Camera” y “Power Output” que se encuentran en la batería externa para interconectar con los cables provenientes de la cámara y el panel.

Por otro lado, como paso experimental previo a inicializar el software, se requiere identificar el bloque denominado “laptop” en la interfaz de la batería para luego conectar dichos terminales con la laptop donde se encuentra instalado el software. Una vez conectado todos los componentes del sistema de electroluminiscencia para certificar que las conexiones realizadas fueron las correctas, se corroboró en el manual de instrucciones. Se realiza el encendido de la batería y posterior a ello se inicializa el software como se puede apreciar en la Figura N°35. Como se detalló en el subcapítulo 2.3.4, los fabricantes de las cámaras de electroluminiscencia facilitan el software a utilizar. Por ello, en el ordenador se encuentra el software instalado llamado “*Greateyes Lumisolar 9.0*”.



Figura N°35. (a) Terminales conectados en la interfaz de la batería. (b) Inicialización del software

Luego de seguir los pasos experimentales explicados previamente y corroborar que todas las conexiones se realizaron según lo indicado en el manual, se realiza el desarrollo de la captura de las imágenes de los paneles fotovoltaicos. En el software, se digita los parámetros de excitación del panel y el tiempo de exposición. Primero, en la ventana ‘Power Supply’ se digitan los valores de corriente máxima y voltaje máximo que va a suministrar la batería hacia

el panel, estos no deben ser mayores a los valores indicados en las especificaciones, y segundo en la ventana ‘Acquisition’ el tiempo de exposición puede variar entre 500ms a 1s. Por último, se presiona el botón ‘Single Shot’ para la captura de la imagen de electroluminiscencia. Al digitar los valores, las ventanas deben resaltarse de color azul como se puede apreciar en la Figura N°36, que significa que los valores digitados se encuentran dentro de los valores límites de la batería.

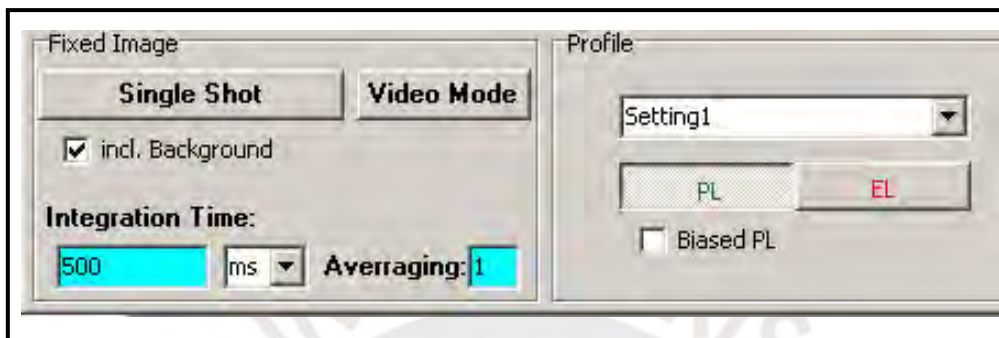


Figura N°36. Ventana de Adquisición de imágenes [67]

En la Figura N°37, se aprecia el resultado obtenido en el software del sistema de electroluminiscencia, en este caso experimental se realizó en las instalaciones del laboratorio de materiales de la sección de física. Por otro lado, en la Figura N°38, se aprecia el montaje del sistema en la azotea de la facultad de Física de la PUCP, donde se encuentran instalados los paneles fotovoltaicos conectados a red.

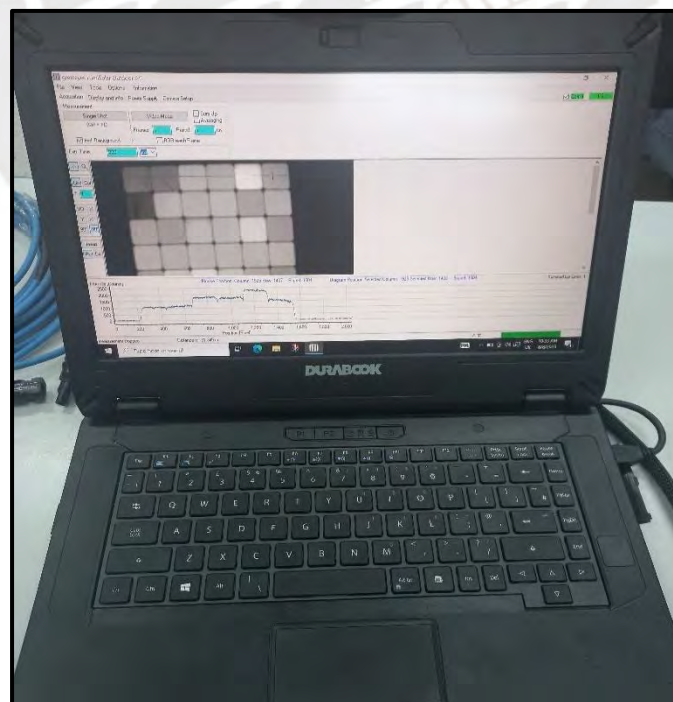


Figura N°37. Software “LumiSolar Outdoor”



Figura N°38. Montaje experimental del sistema de Electroluminiscencia

3.2. Adquisición y selección de imágenes de Electroluminiscencia

La base de datos de imágenes de electroluminiscencia de paneles fotovoltaicos, en la cual se ha realizado el procesamiento de imágenes, están constituidas por las imágenes obtenidas en el proceso experimental y por imágenes almacenadas en el Drive del grupo de investigación “*Mater*”. Todas las imágenes están etiquetadas en base al nombre del panel fotovoltaico, el voltaje de excitación, corriente de excitación, medidas del filtro, tiempo de exposición y valor de apertura de la cámara. Las características antes mencionadas, son aquellas que se varían en el proceso experimental de captura, ello permitió obtener un número mayor de imágenes de electroluminiscencia. En la Figura N°39, se aprecia la base de datos facilitada por el grupo “*Mater*”, en la cual se encuentran las carpetas Reserva, Conectados a red, Micro Inversor y Trazador. En la tabla 10, se puede evidenciar la distribución de las imágenes de electroluminiscencia que constituyen la base de datos.

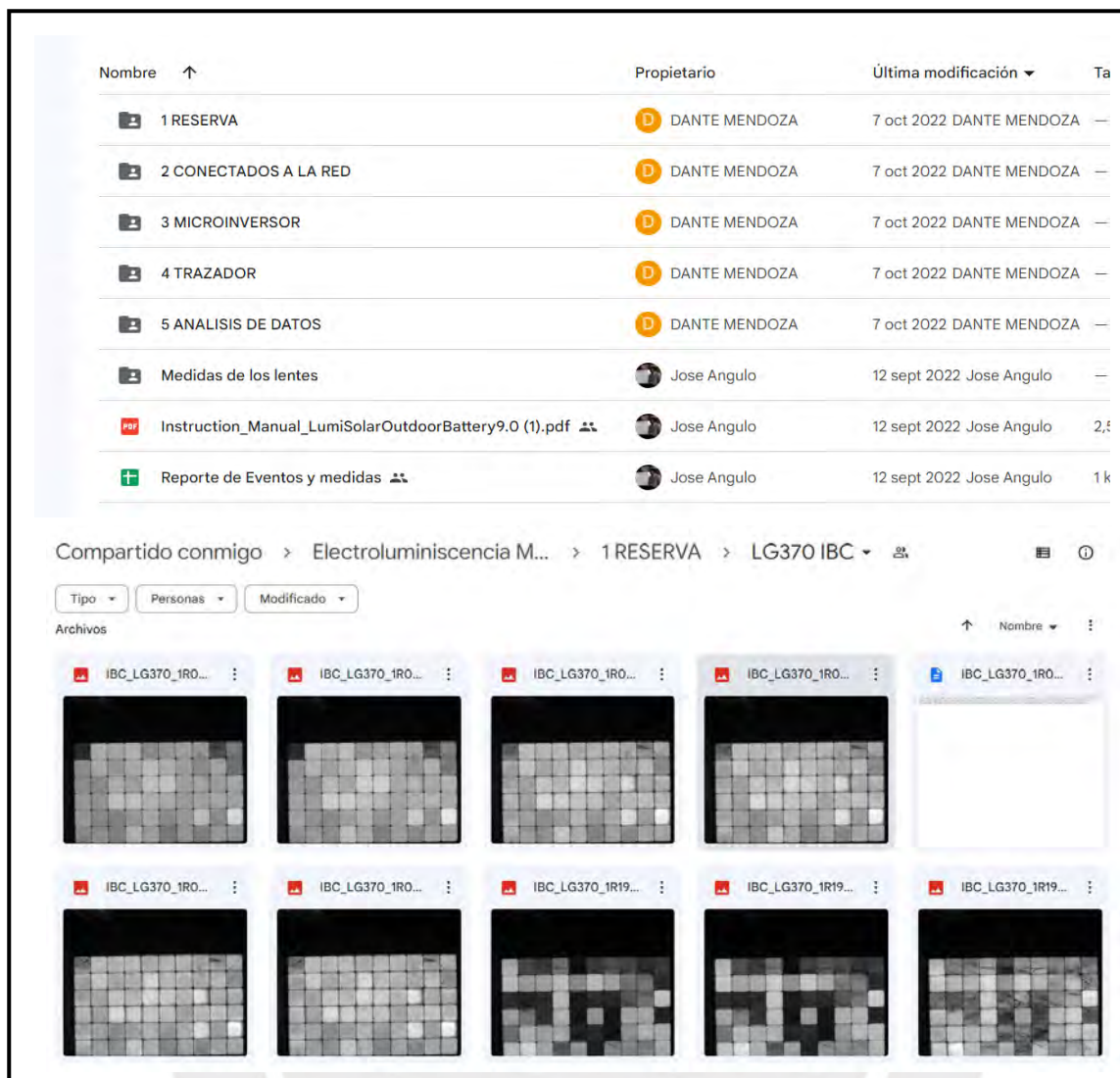


Figura N°39. Base de datos de imágenes de Electroluminiscencia de Paneles fotovoltaico

Tabla 10. Distribución de imágenes de electroluminiscencia por Carpeta

Nombre de panel	Nombres de carpetas			
	Reserva	Conectados a red	Micro inversor	Trazador
CDF1150A1 / CIGS	25	30	6	6
LG 345 / IBC	21	-	-	-
LG 370 / IBC	13	-	6	6
PANASONIC NE / HIT	-	30	-	-
CANADIAN / PERC	-	30	-	-

Para las investigaciones de la tesis, las imágenes de electroluminiscencia serán clasificadas en base a lo requerido por el grupo “Mater”. La clasificación se realizará en base a las tecnologías CIGS, HIT y PERC debido que sus características son muy distintas a las tecnologías entre sí.

Por ello, luego de adicionar las imágenes del driver facilitado por el grupo Mater y las imágenes tomadas en el proceso experimental se organizó una base de datos para el proceso del entrenamiento de la red neuronal que consistió en 79 imágenes con tecnología CIGS, 40 con tecnología HIT y 35 con tecnología PERC. En total se obtienen 154 imágenes de electroluminiscencia con una resolución de 2048x2102 pixeles, los cuales algunas de ellas corresponden a un mismo panel, pero variando sus características de captura.

3.3. Desarrollo del procesamiento de imágenes

Se busca realizar un análisis cuantitativo a las imágenes de electroluminiscencia obtenidas en la base de datos. Por ello, se plantea un modelo de solución en base a los pasos fundamentales del procesamiento de imágenes con el objetivo que mediante el preentrenamiento de una Red Neuronal Convolutiva se pueda clasificar la tecnología del panel fotovoltaico y posterior a ello si consiste en un panel de tecnología HIT se realiza la clasificación del estado físico de las celdas que constituyen el panel.

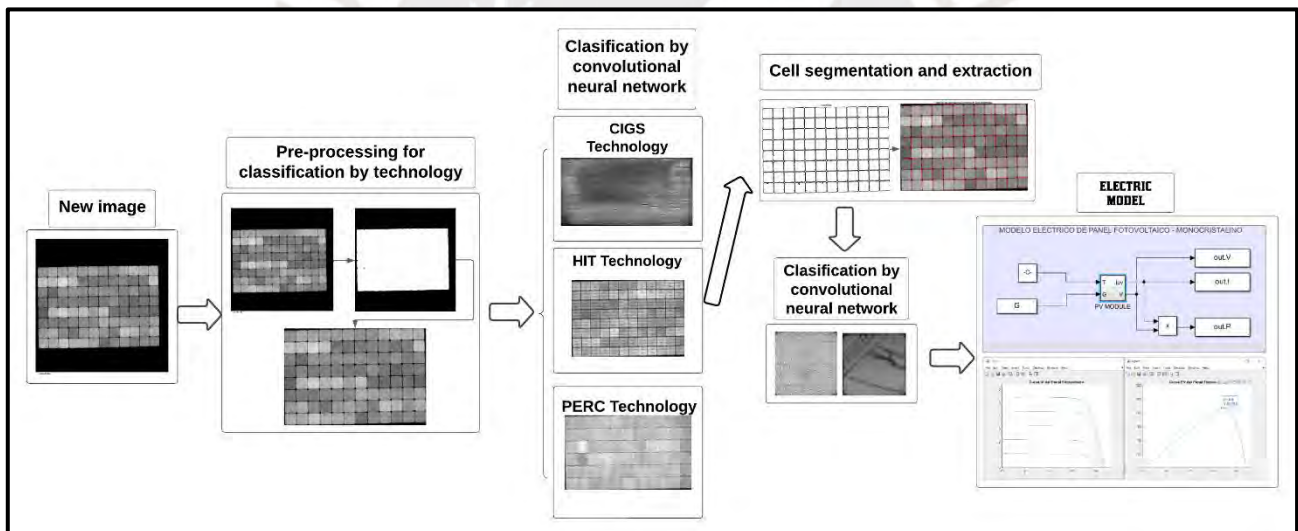


Figura N°40. Desarrollo de los procesos realizados

3.3.1. Etapa de Pre-Procesamiento

La imagen de electroluminiscencia obtenida por el software, es una imagen digital de formato “Mapa de Bits” y contiene componentes en RGB, es decir existe intensidad de luz en los tres colores primarios (Rojo, verde y azul). En la Figura N°41, se aprecia la imagen obtenida por medio del sistema de Electroluminiscencia en donde cada pixel cuenta con intensidad de color en los tres colores primarios.

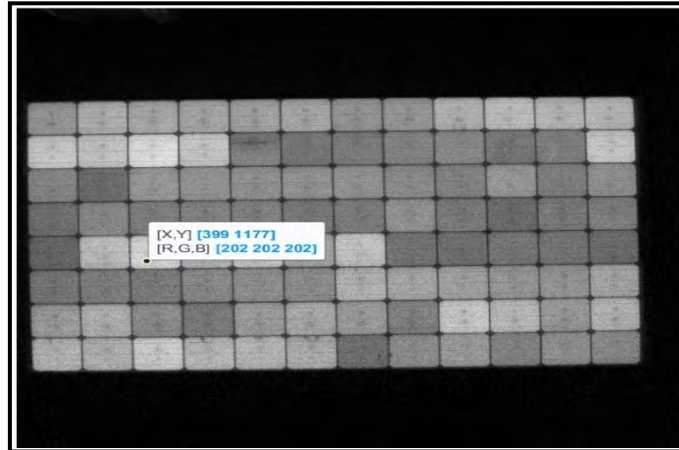


Figura N°41. Imagen original de Electroluminiscencia de Panel Fotovoltaico

Los tres niveles de intensidad son evaluados independientemente por medio de las tres matrices que contienen la información de cada color primario. Con el objetivo de determinar si existe información relevante en cada componente de color de las imágenes obtenidas, se realiza un análisis a los histogramas de intensidad de los pixeles de cada color. En Figura N°42, se aprecia los histogramas y se determina que las tres matrices tienen los mismos valores de intensidad de los pixeles. Por ello, se opta en convertir la imagen en escala a grises que va a permitir simplificar el procesamiento y reducir los datos. En el entorno de Matlab se realiza mediante la función 'im2gray'[68].

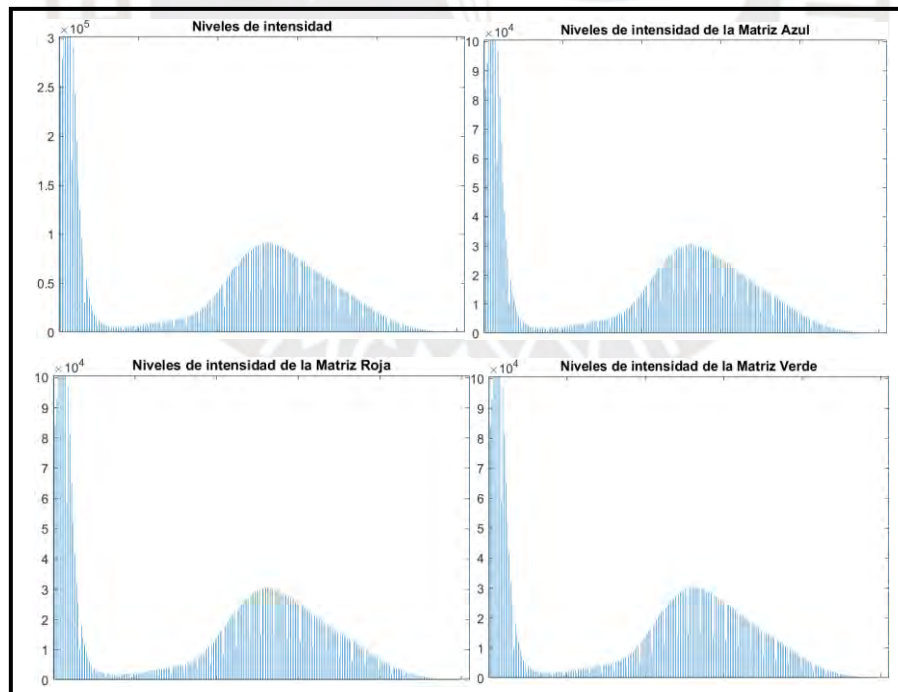


Figura N°42. Histograma de valores de intensidad de los pixeles

En el siguiente paso del preprocesamiento se busca aislar el área de interés de la imagen, es decir el área primordial en la extracción de características consiste en las celdas que constituyen

el panel fotovoltaico. Sin embargo, producto del reflejo de las ondas electromagnéticas producidas por el panel ocasiona que el fondo de la imagen no sea completamente negro. Por ello, a partir de la evaluación del histograma de las imágenes se opta por aplicar el método de ‘Otsu’, el cual consiste en calcular un umbral automático para diferenciar el conjunto de píxeles que constituyen el fondo y el conjunto de píxeles que constituyen el área de interés que sería en este caso el área de las celdas fotovoltaicas. En Matlab, se puede utilizar la función denominada ‘graythresh’ [69] para obtener el umbral requerido en la imagen a escala de grises. Se puede apreciar en la Figura N°43, que la imagen se convierte a binario y se define dos secciones. La sección del fondo y la sección de interés que son representadas por un 0 y un 1 respectivamente.

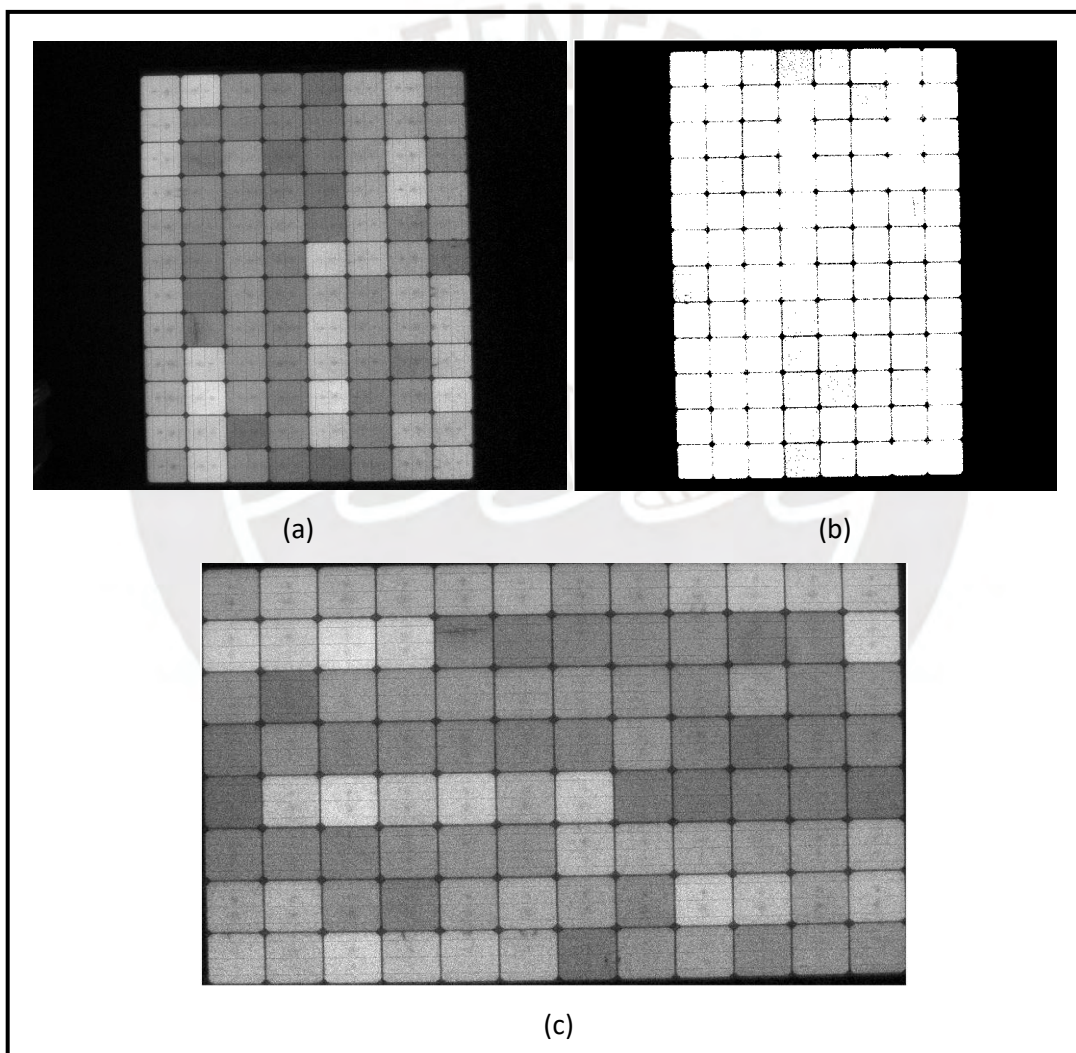


Figura N°43. (a) Imagen original de Electroluminiscencia de Panel Fotovoltaico. (b) Imagen umbralizada con zona de interés de Panel Fotovoltaico. (c) Imagen limita por área de interés

Posterior a la obtención del área de interés, se procede a obtener las características de dicha región mediante la función denominada ‘bwlabel’ [70], que va a asignar etiquetas a toda el área

de interés para luego mediante la función ‘*regionprops*’ extraer las coordenadas del área de interés y limitar la imagen original. En la Figura N°43 (c), se puede apreciar el resultado para la limitación del área de interés.

3.3.2. Etapa de Clasificación por Tecnología

La imagen previa, en donde se limita solo el área de interés, va a permitir la clasificación adecuada de la tecnología del panel. Como se indicó previamente, se clasificará en las tres tecnologías de paneles fotovoltaicos con las que cuenta la facultad de Física. Para ello, se hace uso de la herramienta en el entorno de Matlab denominada Deep Learning Toolbox. Se evalúa el uso de una red neuronal pre entrenada que brinde buena precisión y sin gastar muchos recursos, entendiéndose por el uso de GPU.

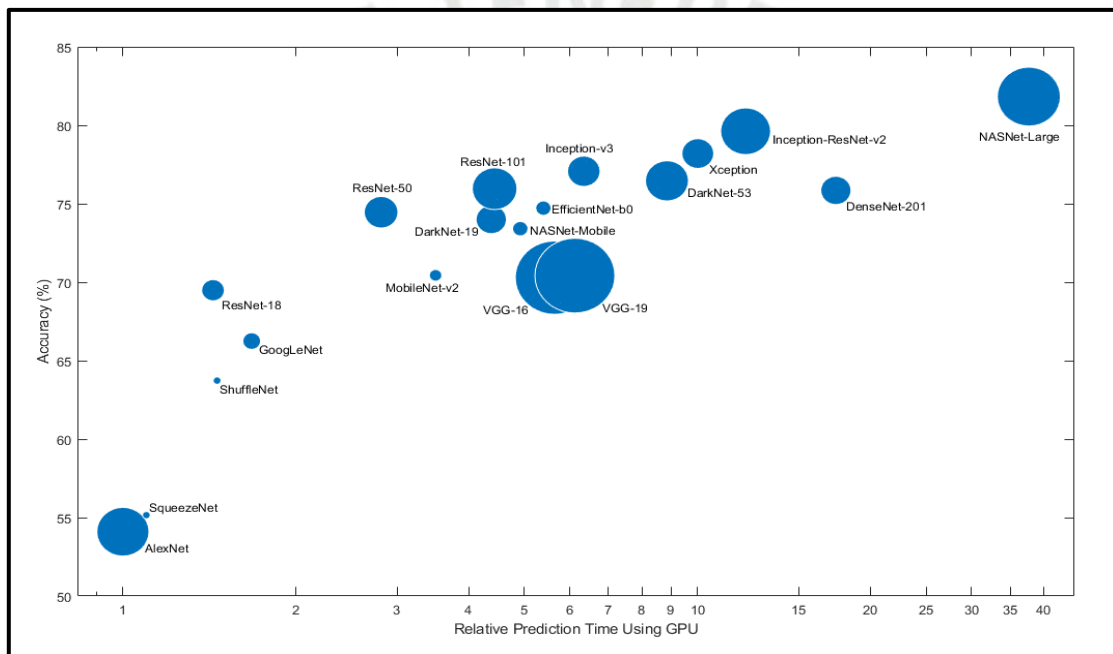


Figura N°44. Comparación de redes neuronales pre entrenadas

La Figura N°44, sirve como una guía brindada por Matlab respecto a las características de las redes neuronales pre entrenadas respecto a la precisión de clasificación frente al tiempo de predicción con el uso de un GPU moderno[71]. En base dicha guía, se evaluó los porcentajes de precisión de la red pre entrenada “ResNet-50” y “DarkNet-19” debido a que según la guía sus porcentajes de precisión y recursos no varían significativamente. Además, la investigación realizada por Abdullah.Vetter [50] demostró las capacidades de las redes neuronales pre entrenadas “ResNet-24” y “ResNet-34” para clasificar defectos en paneles fotovoltaicos mediante imágenes de electroluminiscencia. Se decidió elegir la red neuronal previamente entrenada denominada “ResNet-50” [72] debido a que sus valores de precisión obtenidos experimentalmente son mayores a los de “DarkNet-19” para la clasificación de tecnologías de

paneles fotovoltaicos, ello se puede comparar en la Tabla 11 y 12, con ello se verifica que para la aplicación planteada en la investigación, la familia de redes pre entrenadas “ResNet” brinda un mayor porcentaje de precisión como lo planteado en la investigación de Vetter.

Esta red será entrenada con el objetivo de clasificar las tecnologías del panel fotovoltaico. Previo a la clasificación, se realiza el entrenamiento de la red neuronal con el uso de la base de datos que abarca las tres tecnologías indicadas. En la Figura N°45, se muestra el proceso del entrenamiento de la red con las configuraciones de iteraciones indicadas.

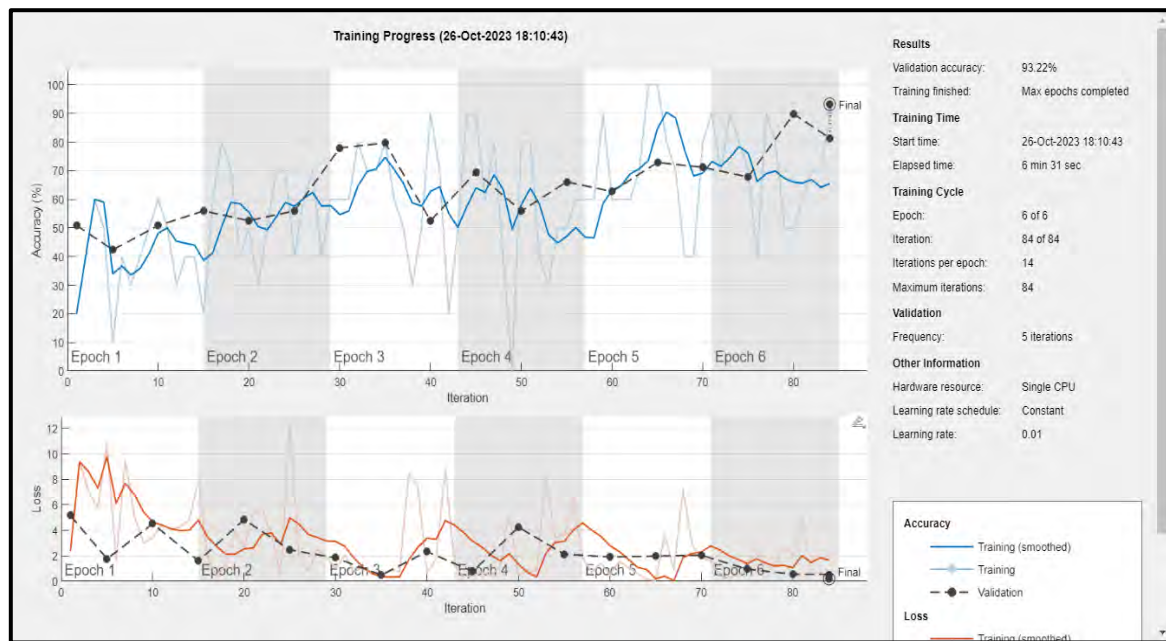


Figura N°45. Diagrama de entrenamiento de Red Neuronal

Posterior al entrenamiento y clasificación de la tecnología de panel fotovoltaico, las siguientes etapas se centran en la tecnología HIT ya que sus características cualitativas permiten la segmentación y clasificación entre celdas con defecto y sin defectos. El modelo propuesto permite la clasificación celda por celda, identificando defectos en cada área que constituía la celda fotovoltaica. En comparación con una investigación similar que clasificó imágenes EL de paneles defectuosos [48], la metodología planteada arrojó mayor precisión y exactitud en la identificación de defectos.

3.3.3. Etapa de Segmentación

La presencia de ruido en las imágenes, limitadas en el área de interés, puede ocasionar dificultades al segmentar la imagen. Por ello, se aplica el filtro de mediana que va a reducir los picos de variaciones de intensidad presentes entre píxeles vecinos. Como consecuencia de este filtro la imagen tendrá una mejor calidad y se va a eliminar el ruido denominado sal y pimienta

presente en la imagen. En el entorno MATLAB para aplicar dicho filtro, utilizamos la función 'medfilt2'[73] junto a un valor de ventana de 12, es decir se calcula la mediana de los pixeles alrededor de un cuadrado de 12x12.

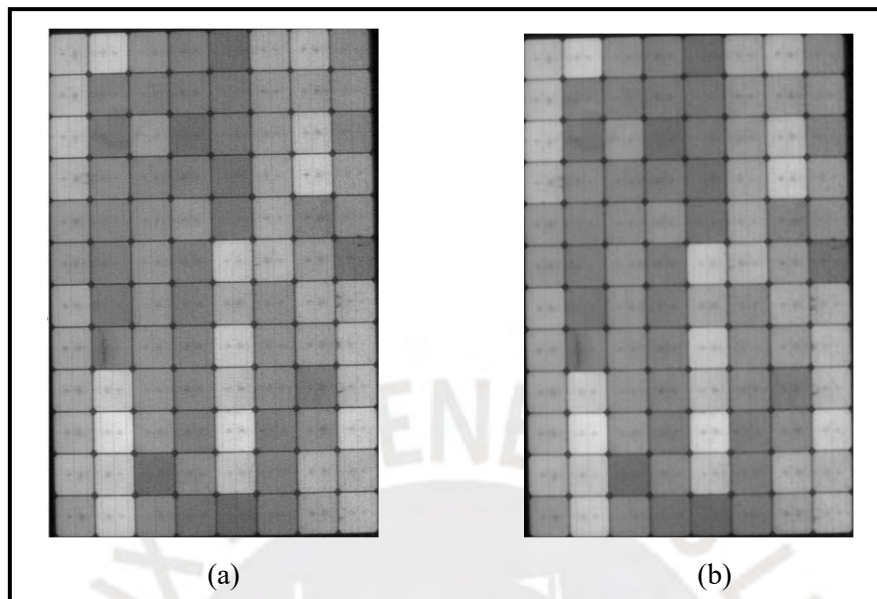


Figura N°46. (a) Imagen limitada de EL de Panel Fotovoltaico. (b) Imagen limitada y filtrada de EL de Panel Fotovoltaico

En el siguiente proceso, se busca remarcar las características de los defectos existentes en las celdas fotovoltaicas. Se realiza un proceso de detección de bordes en las imágenes previamente filtradas. Ello va a permitir remarcar los bordes para luego en la extracción de características poder diferenciar los bordes que no siguen un mismo patrón. Para ello, en MATLAB se realiza la convolución de las matrices correspondientes al filtro "Solbel" en el eje x y eje y.

El resultado obtenido permite visualizar adecuadamente los bordes de las celdas. Sin embargo, al realizar una inspección visual se puede apreciar que no todos los bordes están conectados entre sí. Se buscó que las celdas estén aisladas para la extracción de la información de cada celda. Por este motivo, se realiza operaciones morfológicas con el objetivo de que todas las celdas se encuentren aisladas y permita realizar la clasificación individualmente a cada celda, mediante la función 'imdilate' [74] mejora los bordes con operaciones de dilatación morfológica. En la Figura N°47 (e), se muestra el resultado de la segmentación resultante.

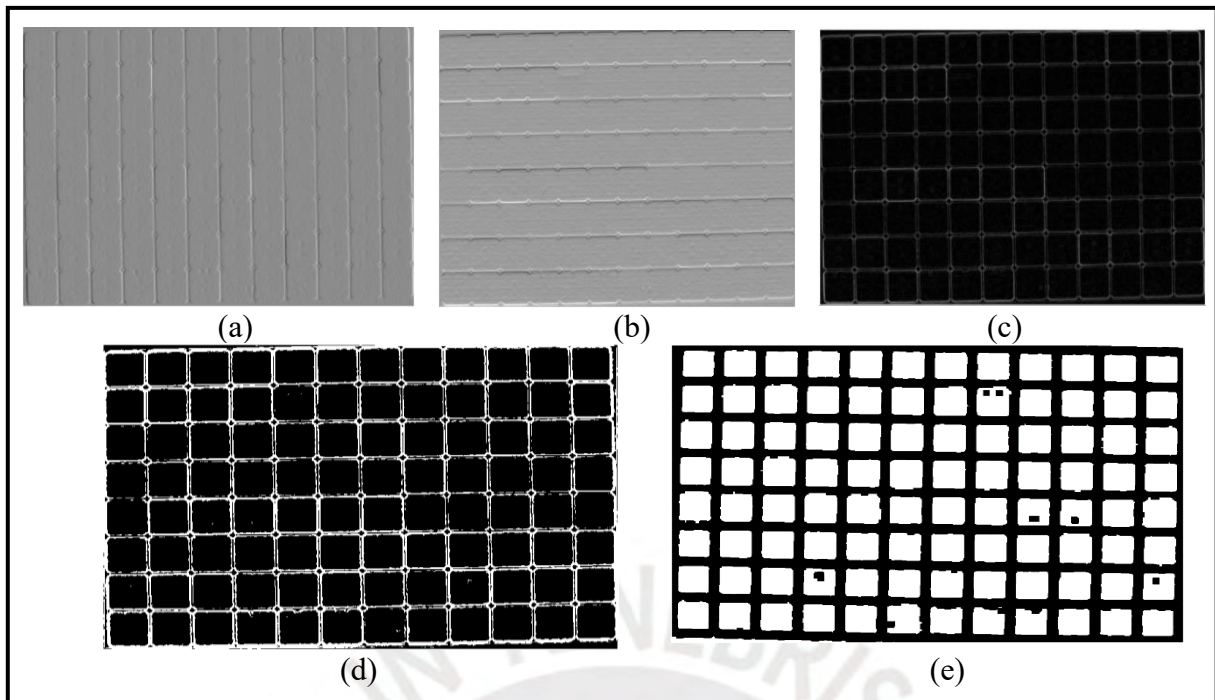


Figura N°47. (a) Aplicación del filtro “Solbel” eje y. (b) Aplicación del filtro “Solbel” eje x. (c) Imagen resultante de los filtros en cada eje. (d) Imagen segmentada por el filtro “Solbel”. (e) Imagen segmentada por bordes dilatados

Las etapas indicadas previamente son aplicadas a todas las imágenes de electroluminiscencia de paneles fotovoltaicos. El objetivo de las etapas del procesamiento indicado consiste en extraer las coordenadas de las celdas para la clasificación correspondiente a cada celda. En la Figura N°48, se presentan imágenes segmentadas de electroluminiscencia con presencia de defectos, los cuales se diferencian de un panel sin defecto.

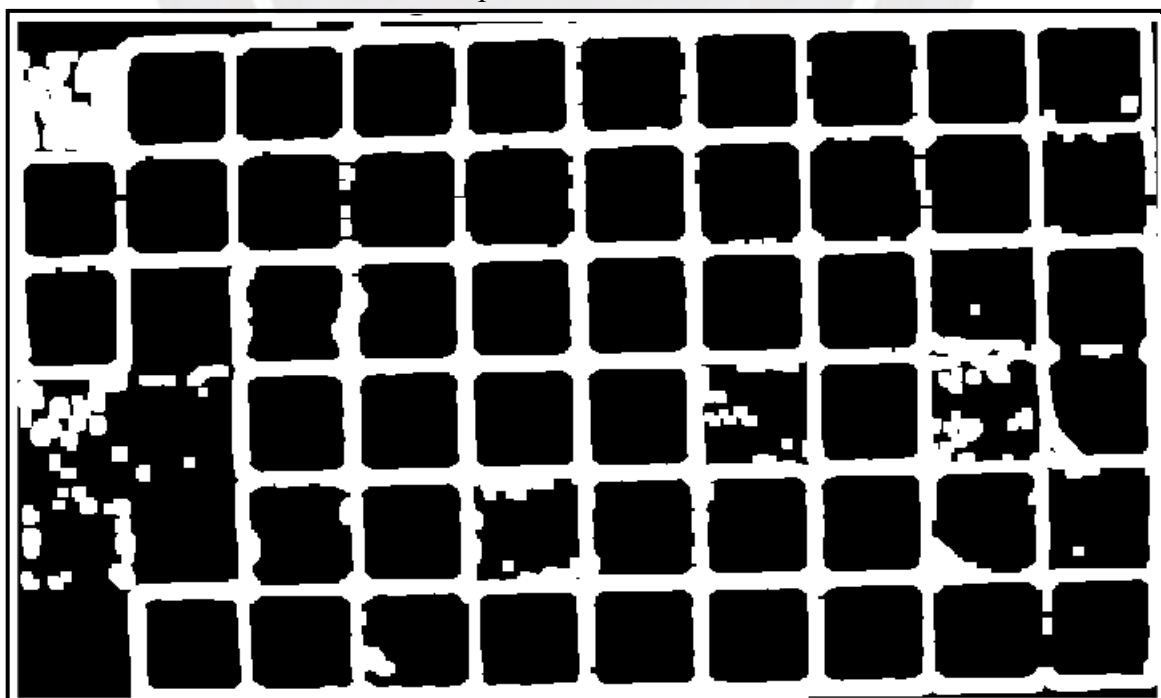


Figura N°48. Imagen de EL segmentada de Panel Fotovoltaico con defecto

3.3.4 Etapa de Extracción de características

Una vez obtenida la imagen segmentada, se procede a limitar las áreas de las celdas. Para ello se utiliza la función de Matlab denominada *'bwlabel'* [70], que va asignar etiquetas a los los pixeles conectados que forman alguna área. Una vez obtenidas las etiquetas de las áreas conectadas, se procede mediante la función *'regionprops'*, a extraer las características de las áreas etiquetadas previamente. Una de las propiedades que constituyen esta función es el de *'Área'*, la cual me va a permitir obtener la información de la frecuencia y tamaño de las áreas.

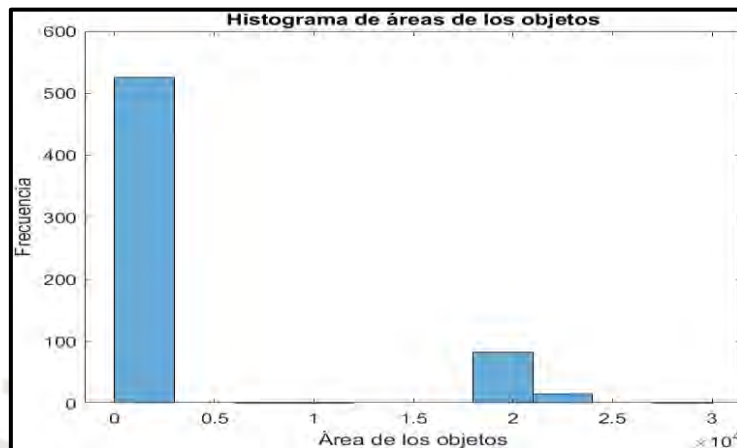


Figura N°49. Histograma de áreas de los objetos que constituyen las celdas

Al analizar la información de las áreas, se limita el valor de un área mínima y una máxima que va a permitir que se pueda extraer la información de cada celda independiente. Al utilizar la propiedad *'BoundingBox'* se calcula el rectángulo que bordea el área de la celda. Como se puede apreciar en la figura N°50, el área de cada celda ha sido identificada y se obtenido las coordenadas del rectángulo que bordea el área para mediante la función *'imcrop'* [75] recortar la imagen original según las coordenadas anteriormente extraídas.

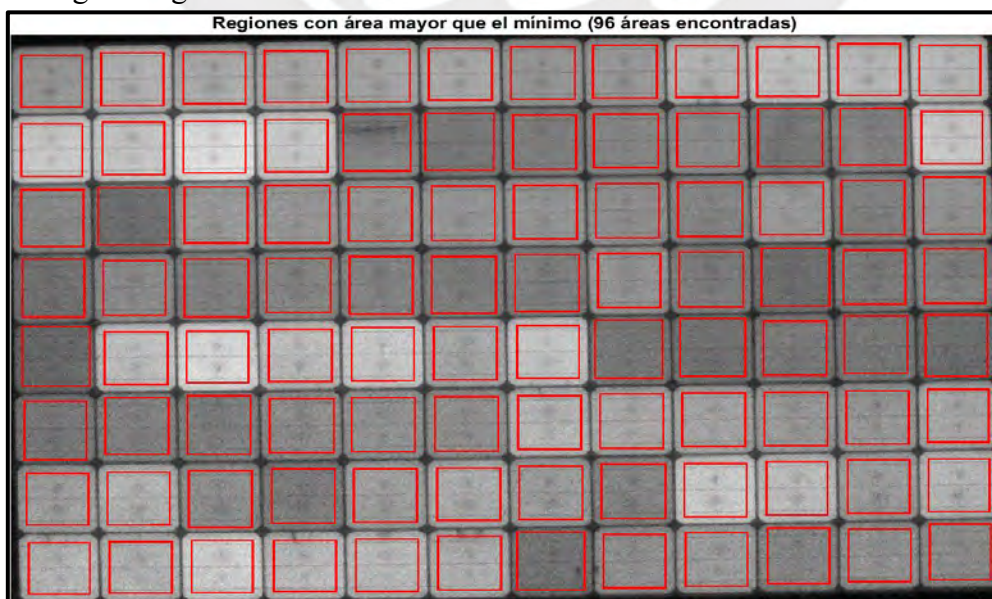


Figura N°50. Extracción de característica de las celdas del Panel fotovoltaico

3.3.5 Etapa de Clasificación por celda

El proceso descrito anteriormente permitió recortar la imagen original en celdas. Así, fue posible obtener imágenes independientes de cada celda que, a través de iteraciones, se clasificaron celda por celda utilizando la red neuronal entrenada para analizar si alguna de ellas presentaba algún defecto. Para ello, respecto a lo indicado en el inciso 3.1.1, se opta por elegir la misma red neuronal pre entrenada denominada “ResNet-50” [72]. La red fue entrenada con tres tipos de clases: celda sin defecto, celda con fractura o microfractura y celda con corrosión. Además, la red entrenada podría usarse con diferentes tipos de clases de defectos, como los detallados en la investigación de Dávila-Sacoto [52], que analizó diferentes defectos mediante electroluminiscencia. Sin embargo, la cantidad de celdas con microfracturas y defectos de corrosión fue una limitación para el entrenamiento debido a la pequeña cantidad de imágenes. Por lo tanto, la capa de entrada solo fue adaptada para ser entrenada con 200 celdas sin defectos y 142 celdas con defectos entre fractura o corrosión, se aprecia en la Figura N°51 el diagrama de entrenamiento respecto a las configuraciones indicadas.

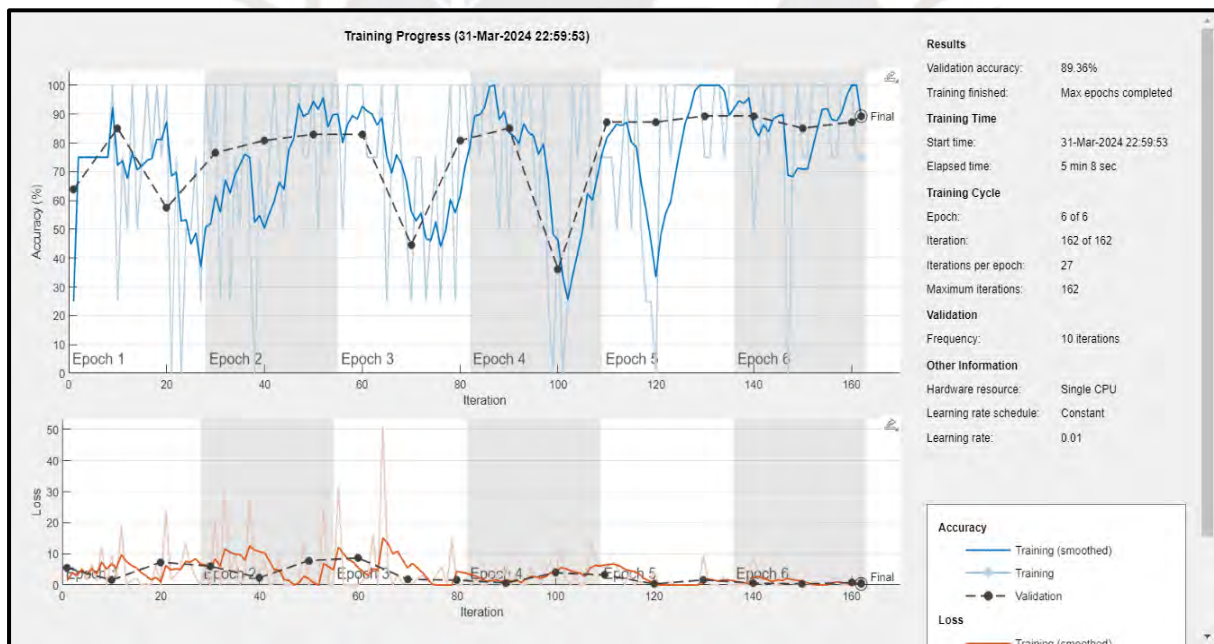


Figura N°51. Diagrama de entrenamiento de Red Neuronal

3.4. Modelo Eléctrico de panel fotovoltaico

En el inciso 2.1.3, se representa el diagrama del circuito equivalente de una celda fotovoltaica. Este modelo básico se representa mediante un diodo y se puede utilizar para proporcionar inicialmente una idea del rendimiento de una celda o de un sistema propio [76]. Mediante la ley de Kirchhoff, se obtiene las ecuaciones de las corrientes en base a las variables representadas en el diagrama [77]. Estas ecuaciones servirán para representar el

comportamiento eléctrico de una celda o de un sistema fotovoltaico. Para el estudio de tesis se emplea MATLAB/Simulink para modelar las ecuaciones matemáticas de las corrientes de una celda. Así mismo, considerando que en la etapa del procesamiento de imágenes se utiliza el mismo software, permitirá la interconexión de información obtenida previamente para el modelado de la curva I-V.

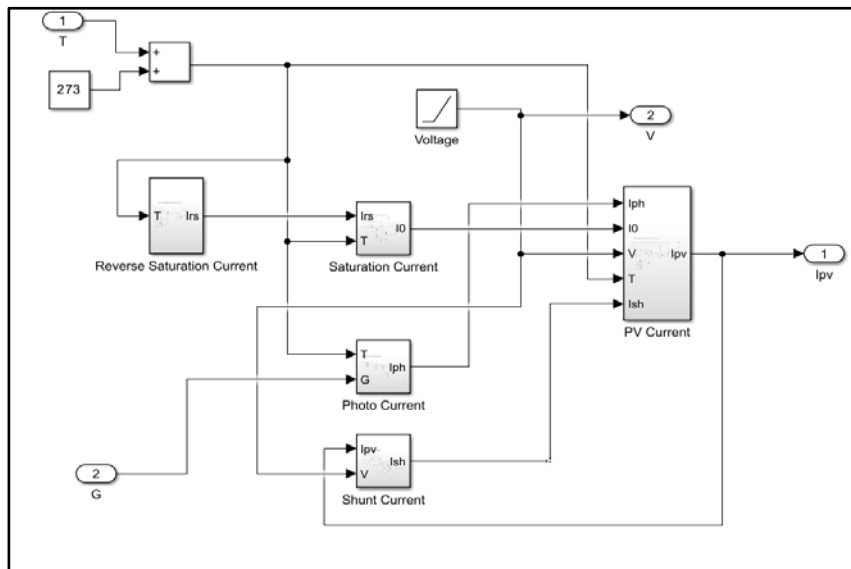


Figura N°52. Modelo de una celda fotovoltaica de un diodo mediante MATLAB/Simulink

En la figura N°52, se visualiza el modelado en Matlab en base a 4 subsistemas que representan las ecuaciones de las corrientes. En contexto de la tesis, se utiliza una base de datos de 3 tecnologías de paneles fotovoltaicos. Por ello, se deberá modificar los parámetros básicos del modelo eléctrico con el objetivo de tener los resultados de curvas I-V semejantes a las obtenidas en las fichas técnicas del panel fotovoltaico. En la Figura N°53, se muestra la curva I-V obtenida mediante el modelo.

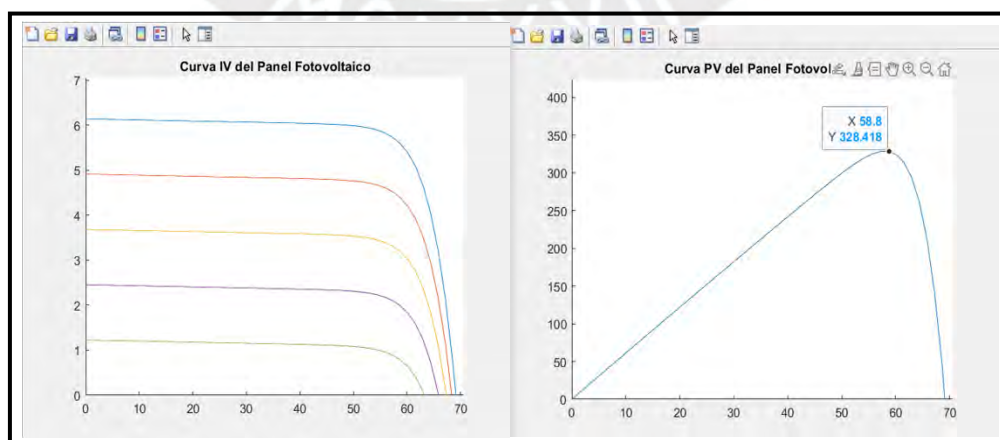


Figura N°53. Curvas I-V del Modelado del Panel Fotovoltaico

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se presentará las pruebas y resultados obtenidos en cada proceso realizado de la investigación. Por otro lado, para la validación de los resultados se utilizaron imágenes de electroluminiscencia que no pertenecen a la base de datos entrenada para la clasificación con el objetivo de corroborar los porcentajes de precisión obtenidos en cada etapa del procesamiento de imágenes.

4.1. Resultados de la Extracción de característica por Celda

El procesamiento propuesto en el inciso 3.3, permite encontrar las coordenadas de cada celda del panel fotovoltaico que se está analizando para posteriormente a ello ser clasificados. Como se aprecia en la Figura N°54, se remarca todas las celdas encontradas con un total de 96 celdas y en la cual, encerrada en círculo amarillo, también se encuentra una celda dañada. Es decir, el proceso planteado cumple con el objetivo de extraer la información de cada celda para ser clasificado adecuadamente.

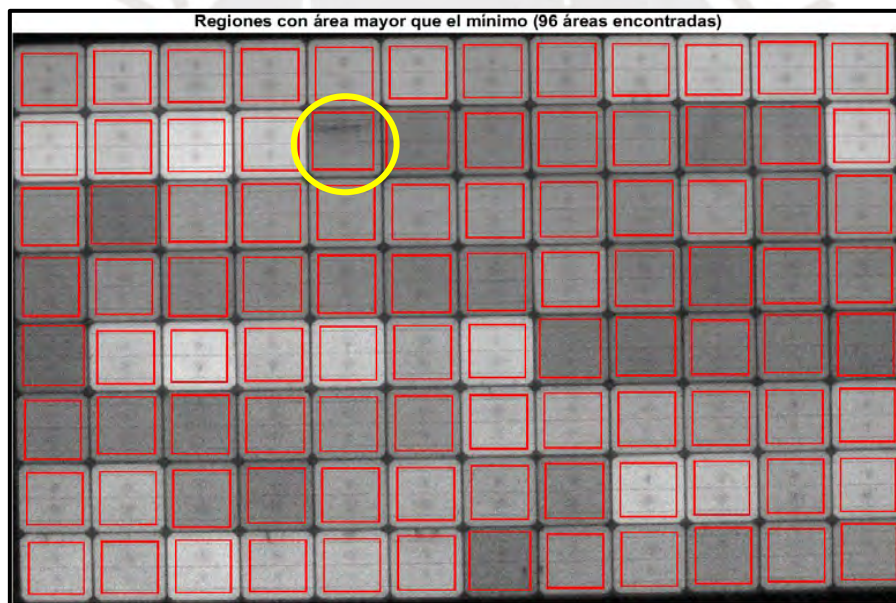


Figura N°54. Resultados de la extracción de características por Celda

Sin embargo, la detección por el algoritmo planteado no suele ser completamente eficaz en todas las imágenes debido a que no todas las imágenes tienen la misma calidad y no son tomadas bajo los mismo parámetros y configuraciones de la cámara. Por ejemplo, en la Figura N°55 (a), tomada de un panel que sufrió daños mecánicos considerables durante el transporte, solo se detecta 50 de 60 celdas (áreas encontradas) y dentro de ellas se encuentran algunas celdas dañadas. El algoritmo descartó algunas de las celdas dañadas que no se percibieron con cierta intensidad de píxeles debido a niveles bajos de intensidad y, en consecuencia, estas áreas se consideraron parte del fondo de la imagen. Por otro lado, en la Figura N°55(b) de un panel

intacto, se detecta 59 de 60 celdas porque la intensidad de los pixeles del borde entre dos celdas no se diferencia y, en consecuencia, el algoritmo detecta esas dos celdas como una sola.

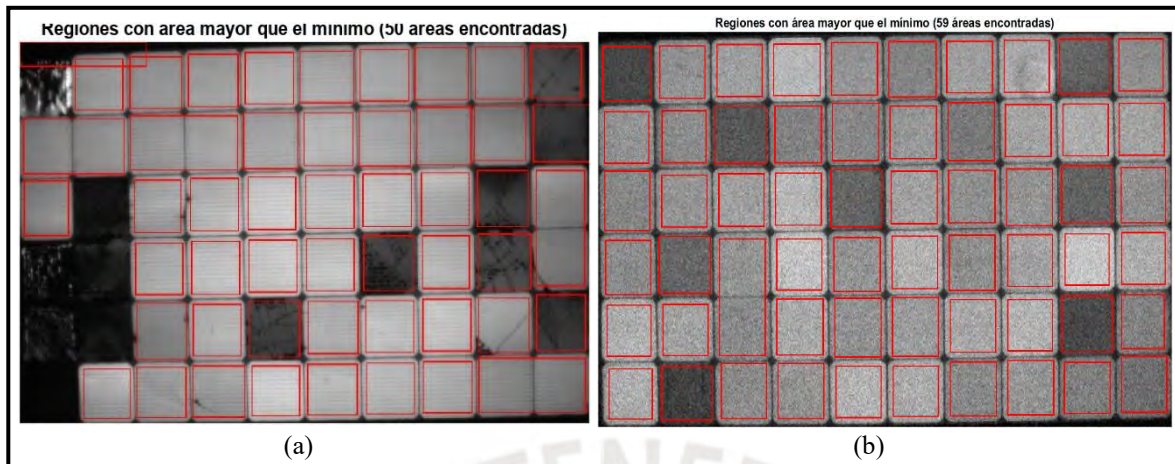


Figura N°55. Resultados erróneos de la extracción de características por Celda

En base a las celdas no detectadas, se concluye que la calidad de la imagen afecta en la extracción de características de cada celda. Así mismo, las celdas las cuales se encuentran desconectadas o dañadas al grado que no se aprecie una intensidad de pixel, no podrán ser clasificada por el algoritmo planteado.

4.2. Resultados del Entrenamiento de Clasificación por Tecnología

Según lo explicado en el inciso 3.3.2, para la aplicación planteada en la investigación se optó por el uso de la red pre entrenada “ResNet-50”. Dicha red se entrenó con la base de datos indicada previamente en el capítulo 3, las cuales fueron redimensionadas a una resolución de 950x550 pixeles con el objetivo de reducir recursos computacionales. Esta red logró clasificar el conjunto de imágenes preprocesadas en tres clases CIGS, HIT y PERC con un porcentaje de precisión que oscila entre 82% a 100%. Los valores de precisión obtenidos junto a las curvas de aprendizaje facilitadas por el entorno Matlab, permite determinar que la red entrenada es eficaz ante clasificación de tecnología de paneles fotovoltaicos. Así mismo, como se aprecia en la Tabla N°11, en cada prueba se incrementó el número de iteraciones para evaluar el rendimiento y convergencia de la red y corroborar que el porcentaje obtenido oscila entre valores óptimos.

Tabla 11. Número de pruebas del entrenamiento de la Red Neuronal ResNet-50 para clasificación de Tecnología.

N° de Pruebas	Porcentaje	Tiempo	Iteraciones	Épocas	Iteraciones por época
1°	82.35%	64 min 10 sec	282	6	47
2°	82.35%	44 min 10 sec	150	6	25
3°	88.24%	62 min 52 sec	120	6	20
4°	100.00%	35 min 40 sec	66	6	11
5°	97.06%	47 min 09 sec	60	6	10
6°	100.00%	25 min 10 sec	48	6	8

Tabla 12. Número de pruebas del entrenamiento de la Red Neuronal DarkNet-19 para clasificación de Tecnología.

N° de Pruebas	Porcentaje	Tiempo	Iteraciones	Épocas	Iteraciones por época
1°	60.47%	47 min 46 sec	282	6	47
2°	86.05%	33 min 52 sec	150	6	25
3°	88.37%	36 min 49 sec	120	6	20
4°	100.00%	31 min 44 sec	66	6	11
5°	95.35%	32 min 47 sec	60	6	10
6°	100.00%	43 min 22 sec	48	6	8

En base a los resultados obtenidos, se concluye que el porcentaje de precisión de la red neuronal varía en base al recurso computacional utilizado. Así mismo, el porcentaje obtenido en las pruebas tienen una diferencia notable y ello es producto a la poca cantidad de imágenes que se tienen para el entrenamiento de la red.

4.3. Resultados de la validación de la Red Neuronal Entrenada

Para la validación de la red neuronal que permite clasificar la tecnología de paneles fotovoltaicos se utilizaron 20 imágenes de electroluminiscencia que no pertenecían a la base de datos utilizada para el entrenamiento de la red Neuronal “Rest.Net50”.

Tabla 13. Resultado de la validación de la Red Neuronal Entrenada

N° Imagen	Descripción el Panel	Clasificación por experto	Clasificación por Red Neuronal
1	CANAD_CS1H-335_20029	Tecnología PERC	Tecnología PERC
2	CANAD_CS1H-335_20029	Tecnología PERC	Tecnología PERC
3	Canadian_20004	Tecnología PERC	Tecnología PERC
4	Canadian_20011	Tecnología PERC	Tecnología CIGS
5	Canadian_20011	Tecnología PERC	Tecnología PERC
6	Canadian_20029	Tecnología PERC	Tecnología PERC
7	Canadian_20030	Tecnología PERC	Tecnología PERC
8	CIGS CDF115A1_1179 AR	Tecnología CIGS	Tecnología CIGS
9	CIGS CDF1150A1_1197AR	Tecnología CIGS	Tecnología CIGS
10	CIGS_1179AR	Tecnología CIGS	Tecnología CIGS
11	CIGS_1184AR	Tecnología CIGS	Tecnología CIGS
12	CIGS_1186AR	Tecnología CIGS	Tecnología CIGS
13	CIGS_1197AR	Tecnología CIGS	Tecnología CIGS
14	PANAS_VBHN330_29878	Tecnología HIT	Tecnología HIT
15	panasonic_NE29802	Tecnología HIT	Tecnología PERC
16	panasonic_NE29863	Tecnología HIT	Tecnología HIT
17	panasonic_NE29878	Tecnología HIT	Tecnología HIT
18	panasonic_NE31242	Tecnología HIT	Tecnología PERC
19	panasonic_NE31406	Tecnología HIT	Tecnología HIT
20	panasonic_NE31406	Tecnología HIT	Tecnología HIT

En la Tabla N°13, se detalla el número de panel, la descripción del panel, el resultado de la clasificación empírica realizada por un experto y la clasificación realizada por la red neural. Del total de las imágenes utilizadas para la validación de la red, se tiene que el 85% fueron clasificadas correctamente por la red neuronal entrenada. Sin embargo, el 15% de las imágenes fueron clasificadas como otra tecnología que no le corresponde. Por ello, se analiza las tres imágenes las cuales fueron clasificadas incorrectamente para determinar cuáles son las características de la imagen y cuáles fueron los criterios que se utilizaron para la toma de la imagen de electroluminiscencia.

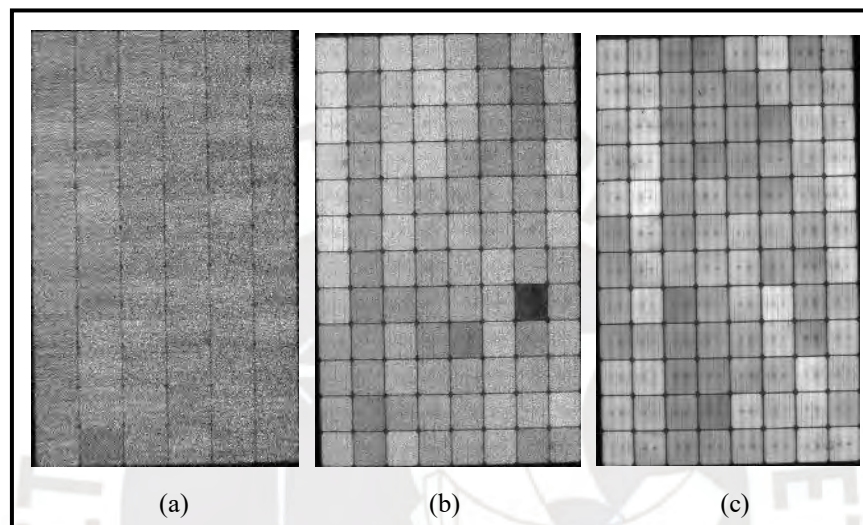


Figura N°56. (a) Panel Canadian_20011 (b) Panel panasonic_NE29802 (c) Panel panasonic_NE31242

La figura N°56 (a), ha sido toma con un valor de apertura de 28, que es el valor seleccionado en el lente de la cámara al momento de realizar la toma de imagen, lo que provocó a que la imagen no sea clasificada adecuadamente. Por otro lado, la figura N°56 (b) y (c) corresponden a la misma tecnología de panel. Sin embargo, las condiciones de disparo no eran las mismas y el valor de apertura de la cámara varía considerablemente de una imagen a otra. La figura N°57 (b) se tomó con un valor de 4 de apertura, y la figura N°56 (c) del panel fue adquirida con una apertura de 56. El valor de apertura de una cámara varía en la cantidad de luz capturada, nitidez y calidad de la imagen. Al tener configurada la cámara con un valor de apertura pequeño dejará entrar menos luz y con un valor de apertura mayor, dejará entrar más luz[78]. Por ello, el no tener un parámetro fijo de apertura para la cámara de electroluminiscencia va a ocasionar que los niveles de intensidad de los pixeles de la imagen capturada del panel varíen respecto a otros paneles de la misma tecnología. Se concluye, en base al análisis realizado a los resultados, que se debe establecer las configuraciones adecuadas para la cámara que garantice la obtención de imágenes de electroluminiscencia con buena calidad.

4.4. Resultados del Entrenamiento de la Red Neuronal para la clasificación de celdas

Los resultados del entrenamiento de la Red Neuronal utilizada para el proceso de clasificación de celdas, es obtenida en base a las celdas de los paneles fotovoltaicos que pertenecen a la base de datos y se adiciona el “dataset” de la investigación de Roger French [79] con el objetivo de ampliar la clasificación del tipo de celda. Sin embargo, como se especificó en el inciso 3.3.5 la cantidad de imágenes fue un limitante para ampliar las clases de clasificación. Por ello, la red neuronal entrenada va a permitir clasificar las celdas del panel fotovoltaico entre celda buena y celda dañada o corroída. Los resultados de precisión del entrenamiento oscilan entre 87% y 89%. Debido a que la base de datos para la clasificación de celdas tiene una cantidad de datos de 342 imágenes de celdas, se opta por aumentar el número de iteraciones con el objetivo de obtener un porcentaje mayor de precisión. Finalmente se realizó la validación de la clasificación por celda para el panel HIT, en el cual se clasificaron las 96 celdas que componen el panel. Aquí se obtuvieron 93 células sin defectos y 3 con defectos. Sin embargo, se clasificaron 2 celdas incorrectamente, pues en el panel se encuentran 5 celdas con defectos. La Figura N°57 muestra las tres celdas correctamente clasificadas con defectos, y la Fig. N°58 muestra las dos celdas clasificadas incorrectamente, pues fueron clasificadas como celdas sin defecto. En el ejemplo dado, el algoritmo pudo clasificar correctamente 93 células. Sin embargo, hubo dos células con presencia de algún defecto que no fueron correctamente clasificadas.

Tabla 14: Número de pruebas del entrenamiento de la Red Neuronal para clasificación de Celda

N° de Pruebas	Porcentaje	Tiempo	Iteraciones	Epocas	Iteraciones x epoca
1°	73.79%	16min 48 sec	480	6	80
2°	81.55%	13min 25 sec	360	6	60
3°	81.55%	15min 21 sec	288	6	48
4°	72.99%	13min 04 sec	240	6	40
5°	71.90%	11min 48 sec	204	6	34
6°	88.35%	08min 35 sec	120	6	20

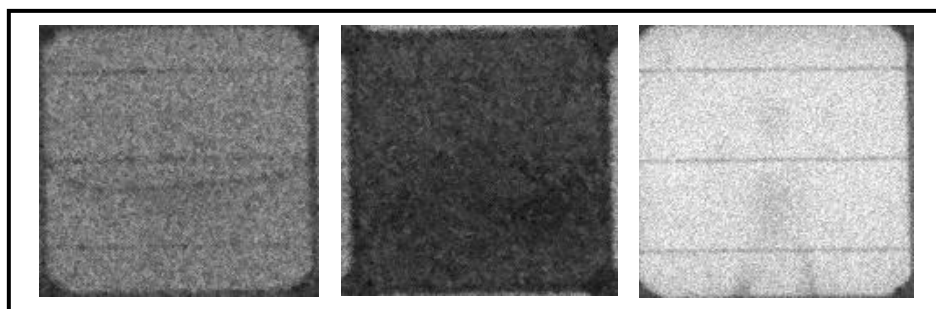


Figura N°57. Clasificación correcta de celdas con defectos

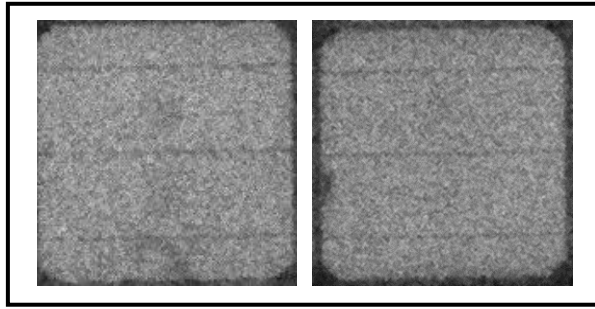


Figura N°58. Clasificación incorrecta de celdas con defectos



CONCLUSIONES

Se aplicaron diferentes configuraciones para las mediciones de electroluminiscencia, ampliando la base de datos. Sin embargo, la resolución de algunas imágenes no permitió un procesamiento adecuado. Pues bien, como las imágenes no tienen buena resolución y presentan ruido, la información de los píxeles que componen la imagen no fue precisa e influye en la exactitud de la clasificación que realizan las redes neuronales entrenadas. La falta de normalizar los valores de configuración ocasiona como limitante que en futuras investigaciones no se pueda comparar o replicar los resultados obtenidos, pues en algunas imágenes los valores fueron significativa y también reduce la validez del conjunto de imágenes que constituyen la base de datos, pues no todas las imágenes son idóneas para el entrenamiento de la red neuronal. Se incluye como limitación la falta de un espacio exclusivamente destinado en el área de física para el proceso de electroluminiscencia al panel fotovoltaico. Esto ocasionó que los parámetros como distancia de la cámara e inclinación del panel no estén normalizados, pues en cada toma se verificó que el panel al que se le aplicara la técnica se ubique paralelo al lente de la cámara, perpendicular al suelo y una distancia de 2 a 3 metros que permita visualizar todo el panel en la imagen. La aplicación errónea de los parámetros indicados ocasionaría que la imagen obtenida pueda no estar completa o una mayor complejidad en el procesamiento de datos producto a la inclinación del panel.

Por otro lado, los modelos de solución propuestos en el trabajo de investigación se pueden utilizar en diferentes instituciones o empresas para inspeccionar o mantener sus paneles fotovoltaicos y evaluar el desempeño del sistema. Las redes neuronales se pueden adaptar con más clases que clasifiquen diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, no se cuenta con una base amplia de nuevos datos que permita ampliar la clasificación de defectos e incluir defectos como la posible degradación inducida y los puntos de desconexión. En la Tesis, la selección del modelo Resnet50, se basó mediante la revisión del estado del arte referentes a la clasificación de imágenes de electroluminiscencia de paneles fotovoltaicos, los resultados obtenidos en la investigación validan la eficacia de la red pre entrenada.

Por último, la investigación desarrollada en la tesis establece una estructura de clasificación de tecnología de paneles y tipos de defectos, limitada por la base de datos. Sin embargo, se plantea bases sólidas para que la clasificación pueda ampliarse a más tecnologías y defectos. Además, El algoritmo formulado en la tesis vincula los resultados del procesamiento de las imágenes de Electroluminiscencia al modelo eléctrico del panel realizado en Simulink, ello permite

representar las curvas I-V ideales del panel en base a su tecnología mediante los datos del panel y la clasificación del tipo de tecnología. Esta relación planteada con la curva I-V es un primer paso para implementar el sistema en tiempo real y obtener un diagnóstico temprano. Considerando las limitaciones planteadas anteriormente, futuros trabajos podrían centrar la investigación en estandarizar los valores de la configuración de la cámara de electroluminiscencia y comparar los resultados de precisión con otras redes pre entrenadas



RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones planteadas, se recomienda estandarizar las configuraciones realizadas en la cámara para cada tecnología de panel fotovoltaico. El valor de la apertura, el valor del filtro y el tiempo de exposición son valores que deben estandarizarse previa un análisis empírico por un experto y a la evaluación de la intensidad de los píxeles que constituyen la imagen de electroluminiscencia. Ello junto al acondicionamiento de un espacio determinado para la aplicación de la técnica de electroluminiscencia permitiría que las imágenes obtenidas no difieran significativamente.

La base de datos utilizada para la investigación puede potencialmente producir resultados óptimos. Sin embargo, se obtuvo una precisión entre el 70% y el 100% en pruebas realizadas con diferentes configuraciones de red. Por tanto, se recomienda realizar la técnica EL sobre nuevos paneles fotovoltaicos de las mismas tecnologías para ampliar la base de datos y obtener resultados más precisos en la clasificación de tecnología y celdas, respectivamente. Para gestionar una nueva base de datos se debe considerar una configuración única para cada tecnología de panel y seguir las instrucciones del manual de usuario proporcionado por el fabricante de la cámara. Asimismo, se requiere de celdas fotovoltaicas dañadas con otro tipo de defectos para ampliar la clasificación que se realiza sobre las celdas. Se pueden obtener aplicando el método sobre paneles que están expuestos a otras condiciones ambientales.

Se propone evaluar en investigaciones futuras el uso de otros modelos de aprendizajes automáticos y evaluar la selección de los parámetros del modelo planteado con el fin de mejorar los porcentajes de precisión y eficiencia. El modelo propuesto puede ser adaptada para ampliando la clasificación de nuevas tecnologías de paneles que se encuentren emergiendo u otros tipos de defectos junto a una base de datos adicional. Además, se requiere investigar los parámetros que constituyen las variables del modelo eléctrico para relacionar la variación que ocasiona un determinado defecto de una celda en los parámetros del modelo eléctrico. Ello permitirá obtener en investigaciones futuras la relación que ocasiona un determinado defecto en la curva I-V.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Producto de esta investigación, se publicó la siguiente contribución científica presentada en la conferencia: *IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) en junio 2024.*



Figura N°59. IEEE MELECON 2024

Cita del Paper:

J. A. P. López, C. A. Paragua-Macuri, D. A. M. Aucaruri, J. R. A. Abanto and J. A. Töfflinger, "Classification of solar panel technology and photovoltaic cell status applying machine learning to electroluminescence images," *2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Porto, Portugal, 2024, pp. 121-126, doi: 10.1109/MELECON56669.2024.10608551.

DOI: [10.1109/MELECON56669.2024.10608551](https://doi.org/10.1109/MELECON56669.2024.10608551)

Publicado en IEEE Xplore: 30 Julio 2024

Indexado en Scopus

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. I. Morales Le Roy, "Detección de anomalías en paneles fotovoltaicos en base a imágenes multispectrales," Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2020.
- [2] H. F. M. Romero *et al.*, "Synthetic Dataset of Electroluminescence Images of Photovoltaic Cells by Deep Convolutional Generative Adversarial Networks," *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7175, vol. 15, no. 9, p. 7175, Apr. 2023, doi: 10.3390/SU15097175.
- [3] L. Pratt, J. Mattheus, and R. Klein, "A benchmark dataset for defect detection and classification in electroluminescence images of PV modules using semantic segmentation," *Systems and Soft Computing*, vol. 5, p. 200048, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.SASC.2023.200048.
- [4] D. A. S. Talledo, C. A. P. Macuri, M. P. Morales, and M. G. P. Macuri, "Study, analysis qualitative-quantitative and carbon footprint impact from photovoltaic energy use," *Proceedings of the 2022 IEEE 29th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2022*, 2022, doi: 10.1109/INTERCON55795.2022.9870097.
- [5] D. A. S. Talledo, C. A. P. Macuri, M. P. Morales, and M. G. P. Macuri, "Análisis cualitativo y dimensionamiento del impacto ambiental del uso de la Energía Fotovoltaica: 3 Casos de estudio en el Perú," *TECNIA*, vol. 33, no. 1, pp. 34–41, Jul. 2023, doi: 10.21754/TECNIA.V33I1.1548.
- [6] B. Aboagye, S. Gyamfi, E. A. Ofosu, and S. Djordjevic, "Degradation analysis of installed solar photovoltaic (PV) modules under outdoor conditions in Ghana," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6921–6931, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.10.046.
- [7] L. Lillo-Sánchez, G. López-Lara, J. Vera-Medina, E. Pérez-Aparicio, and I. Lillo-Bravo, "Degradation analysis of photovoltaic modules after operating for 22 years. A case study with comparisons," *Solar Energy*, vol. 222, pp. 84–94, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2021.04.026.
- [8] A. A. Gamarra Tupac Yupanqui, F. E. Godiño Vilchez, E. D. Huaihua Rojas, D. I. Huaman Izquierdo, and J. E. Villavicencio Vilcapoma, "INCORPORACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS AL CIRCUITO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS," Lima, Dec. 2021.
- [9] C. B. Laureano Oré, "Análisis de Rendimiento de un Sistema Fotovoltaico de 3,2 kW Conectado a la Red Eléctrica en la UNI, Lima," Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2017.
- [10] P. D. Valdiviezo Salas, "DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 15 COMPUTADORAS PORTÁTILES EN LA PUCP," Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2014.
- [11] "Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL." Accessed: Apr. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>
- [12] J. Cepeda and A. Sierra, "Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos".

- [13] E. Bogotá and J. Barbosa Urbano Director, “ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE VARIABLES FOTOVOLTAICAS DE DOS SISTEMAS DE PANELES SOLARES (MONOCRISTALINO Y POLICRISTALINO).”
- [14] “Efecto Foelectrico y Foevoltaico. Explicación y Aplicaciones.” Accessed: Apr. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-foelectrico.html>
- [15] “Tipos de paneles solares y sus características.” Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-paneles-solares-3926.html>
- [16] J. E. Cata Sánchez and F. M. Rodríguez Sócola, “ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO DE SILICIO,” Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2015.
- [17] K. Yoshikawa *et al.*, “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%,” *Nat Energy*, vol. 2, no. 5, Mar. 2017, doi: 10.1038/nenergy.2017.32.
- [18] “TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS - Tritec Intervento.” Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-foevoltaicos/>
- [19] M. E. Muñoz Quintasi, “Diseño de Planta de Ensamblaje de Paneles Solares Foevoltaicos,” Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2021.
- [20] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, *Energía solar foevoltaica*. Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación, 2007.
- [21] M. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Kimoto, Y. Yasaki, T. Kato, and H. Sugimoto, “Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%,” *IEEE J Photovolt*, vol. 9, no. 6, pp. 1863–1867, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2937218.
- [22] “¿CUÁL ES LA ÚLTIMA TECNOLOGÍA EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS? ».” Accessed: Apr. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.cambioenergetico.com/blog/ultima-tecnologia-placas-solares/>
- [23] J. P. Castaño Serna, A. Rubio Clemente, and E. Chica Arrieta, “Evaluación de superficies reflectantes para paneles solares bifaciales mediante la metodología de superficie respuesta,” *Ingeniería*, vol. 27, no. 3, p. e18069, Aug. 2022, doi: 10.14483/23448393.18069.
- [24] A. A. Widayat, S. Ma’arif, K. D. Syahindra, A. F. Fauzi, and E. Adhi Setiawan, “Comparison and Optimization of Floating Bifacial and Monofacial Solar PV System in a Tropical Region,” in *2020 9th International Conference on Power Science and Engineering, ICPSE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020, pp. 66–70. doi: 10.1109/ICPSE51196.2020.9354374.
- [25] “¿Puedo instalar paneles solares bifaciales en instalaciones coplanares? - El Almacén Foevoltaico.” Accessed: Apr. 20, 2023. [Online]. Available: <https://elalmacenfoevoltaico.com/blog/detail/puedo-instalar-paneles-solares-bifaciales-en-instalaciones-coplanares.html>
- [26] J. F. Geisz *et al.*, “Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration,” *Nat Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 326–335, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0598-5.

- [27] C. Schuss *et al.*, “Detecting Defects in Photovoltaic Panels with the Help of Synchronized Thermography.”
- [28] “TRAZADOR DE CURVAS I-V DE CÓDIGO ABIERTO PARA MONITOREO DE RENDIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN BOLIVIA.” Accessed: Apr. 19, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312014000100007
- [29] J. Luis Suárez Castañeda, A. Adolfo, A. Arrieta, F. Javier, and C. Sierra, “Ingeniería y Ciencia,” *ing. cienc*, vol. 8, no. 16, pp. 97–127, 2012, [Online]. Available: <http://www.eafit.edu.co/ingciencia>
- [30] G. L. Silva Mondragón, “APLICACIÓN DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS DE ADOBE Y QUINCHA,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERU, Lima, 2020.
- [31] Atoche Galvez, “Estudio del diseño de un sistema electrónico para detectar a personas con fiebre mediante el uso de una cámara térmica,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ , Lima, 2020.
- [32] “Radiación infrarroja en el espectro de ondas (2) | Academia Testo.” Accessed: Apr. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.academiatesto.com.ar/cms/radiacion-infrarroja-en-el-espectro-de-ondas-2>
- [33] “Aplicación de la termografía en energías renovables - Kapter.” Accessed: Apr. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.kapter.mx/2021/09/08/aplicacion-de-la-termografia-en-energias-renovables/>
- [34] M. H. Ulrike Jahn, *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications*.
- [35] Á. Moretón Fernández, “ESTUDIO DE LA FOTOLUMINISCENCIA EN OBLEAS Y CÉLULAS SOLARES DE SILICIO,” Universidad de Valladolid, Valladolid, 2016.
- [36] A. Barrenetxea Pascual, “DETECCIÓN DE DIFERENTES TIPO DE DEFECTOS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EN CAMPO,” Pamplona, Jun. 2016.
- [37] J. I. Benavides Esteva, R. I. Díaz Suárez, A. I. Roig Rassi, and L. I. Vaillant Roca, “Electroluminiscencia de módulos de silicio policristalino Electroluminescence of silicon polycrystalline modules,” vol. 2022, no. 2, p. 1705, [Online]. Available: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>
- [38] Á. Martín Buenaposada, “Desarrollo de un prototipo para medidas de electroluminiscencia en paneles solares,” Valladolid, Jul. 2021.
- [39] J. Romero, “Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador,” Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2015.
- [40] “Radiación solar: directa e indirecta.” Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.hogarsense.es/placas-solares/radiacion-solar-directa-e-indirecta>
- [41] M. A. Dávila Sacoto, “Estudio de técnicas invasivas y no invasivas para evaluar el deterioro de paneles solares fotovoltaicos,” Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2020.

- [42] S. A. Maggi Silva, "Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile," Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2013.
- [43] J. A. Vilcanqui Apaza, "Estudio para el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes auto configurable para paneles fotovoltaicos," Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2020.
- [44] "Instalacion fotovoltaica aislada - HelioEsfera." Accessed: May 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.helioesfera.com/instalacion-fotovoltaica-aislada/>
- [45] K. Pourhossein and M. Asadi, "Identifying Internal Defects of Photovoltaic Panels Using Sweep Frequency Response Analysis," *Proceedings 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, ACEMP 2019 and 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2019*, pp. 481–485, Aug. 2019, doi: 10.1109/ACEMP-OPTIM44294.2019.9007139.
- [46] C. Huidan and S. Yuming, "Application of MATLAB image processing technology in sewage monitoring system," *ICEMI 2009 - Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, pp. 3993–3995, 2009, doi: 10.1109/ICEMI.2009.5274144.
- [47] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and P. Prentice Hall, "Digital Image Processing Third Edition Pearson International Edition prepared by Pearson Education."
- [48] S. Bordihn, A. Fladung, J. Schlipf, and M. Kontges, "Machine Learning Based Identification and Classification of Field-Operation Caused Solar Panel Failures Observed in Electroluminescence Images," *IEEE J Photovolt*, vol. 12, no. 3, pp. 827–832, May 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3150725.
- [49] R. O. Serfa Juan and J. Kim, "Photovoltaic Cell Defect Detection Model based-on Extracted Electroluminescence Images using SVM Classifier," *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication, ICAIIC 2020*, pp. 578–582, Feb. 2020, doi: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065065.
- [50] Z. Abdullah-Vetter, Y. Buratti, P. Dwivedi, A. Sowmya, T. Trupke, and Z. Hameiri, "Localization of defects in solar cells using luminescence images and deep learning," *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 745–749, Jun. 2021, doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518702.
- [51] J. Alfredo, U. Chávez, and R. Hilda, "Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia Study to detect Defects in Solar Panels by means of Electroluminescence," 2018. [Online]. Available: www.ecorfan.org/republicofperu
- [52] M. A. Davila-Sacoto, L. G. Gonzalez, J. L. Espinoza, and L. Hernandez-Callejo, "Degradation analysis of 5-year field exposed photovoltaic modules using low-cost thermography, electroluminescence and I-V curve tests in Ecuador," *SEST 2020 - 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, Sep. 2020, doi: 10.1109/SEST48500.2020.9203333.
- [53] J. E. Communal, "Comparing camera sensitivity with Noise Equivalent Irradiance," *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing*, vol. 2014-June, Jun. 2014, doi: 10.1109/WHISPERS.2014.8077580.

- [54] "iDus InGaAs Spectroscopy CCD Camera from Andor Technology | Labcompare.com." Accessed: Jun. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.labcompare.com/1320-Spectroscopy-Camera/3845-iDus-InGaAs-Spectroscopy-CCD-Camera/>
- [55] "Clara CCD - Andor Technology PLC - PDF Catalogs | Technical Documentation." Accessed: Jun. 06, 2023. [Online]. Available: <https://pdf.medicalexpo.com/pdf/andor-technology-plc/clara-ccd/90363-170200.html>
- [56] "Zyla 4.2 sCMOS - Andor - 牛津仪器." Accessed: Jun. 06, 2023. [Online]. Available: <https://andor.oxinst.cn/products/scmos-camera-series/zyla-4-2-scmos>
- [57] J. E. Communal, "Comparing camera sensitivity with Noise Equivalent Irradiance," *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing, Evolution in Remote Sensing*, vol. 2014-June, Jun. 2014, doi: 10.1109/WHISPERS.2014.8077580.
- [58] Greateyes GmbH, "Instruction Manual LumiSolarOutdoor Battery Electroluminescence Measurement System." [Online]. Available: <https://www.greateyes.de/en/support.html>
- [59] camware, "User Manual PCO.CAMWARE 4.14.0."
- [60] Milos, Sikula, and P. Krejci, "Defects of Photovoltaic Panels," *Proceedings of the 2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2022*, 2022, doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814146.
- [61] N. G. N. Irias, H. De Paula, P. Pereira, E. N. Cardoso, and B. M. Lopes, "Degradation of photovoltaic panels induced by electric potential: Theoretical survey and computational study on the inverter operation influence," *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2016*, 2015, doi: 10.1109/COBEP.2015.7420165.
- [62] "Photovoltaic module HIT[®] N330/N325," 2018. [Online]. Available: www.eu-solar.panasonic.net
- [63] I. Battery Bank, "PV Home Power System CIGS PV Module Eterbright CIGS PV Module." [Online]. Available: www.eterbright.tw
- [64] C. Solar Inc, "HIGH DENSITY MONO PERC MODULE PRODUCT CERTIFICATES*." [Online]. Available: www.canadiansolar.com,
- [65] "1000nm 50mm Dia., High Performance Longpass Filter | Edmund Optics." Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/p/1000nm-50mm-dia-high-performance-longpass-filter/27835/>
- [66] "High Performance OD 4.0 Longpass Filters | Edmund Optics." Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.eu/f/high-performance-od-4-longpass-filters/13630/>
- [67] "Greateyes - Systems." Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: https://www.greateyes.de/en/systems.html?mCtrl=Model&mOp=View&m_Products%5BmodelId%5D=51
- [68] "Convert RGB image to grayscale - MATLAB im2gray - MathWorks América Latina." Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/im2gray.html>

- [69] “Umbral de imagen global usando el método de Otsu - MATLAB graythresh - MathWorks América Latina.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/graythresh.html>
- [70] “Etiquetar los componentes conectados de una imagen 2D binaria - MATLAB bwlabel - MathWorks América Latina.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/bwlabel.html>
- [71] “Redes neuronales profundas preentrenadas - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ug/pretrained-convolutional-neural-networks.html>
- [72] “Red neuronal convolucional ResNet-50 - MATLAB resnet50 - MathWorks América Latina.” Accessed: Nov. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet50.html>
- [73] “Filtrado de mediana de 2D - MATLAB medfilt2 - MathWorks América Latina.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/medfilt2.html>
- [74] “Dilatar una imagen - MATLAB imdilate - MathWorks América Latina.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imdilate.html>
- [75] “Recortar una imagen - MATLAB imcrop - MathWorks América Latina.” Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imcrop.html>
- [76] A. H. Hasani, S. F. Abdullah, A. W. Mahmood Zuhdi, M. S. Bahrudin, F. Za’Abar, and M. N. Harif, “Modelling and simulation of photovoltaic solar cell using silvaco TCAD and matlab software,” *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings, ICSE*, vol. 2018-August, pp. 214–217, Oct. 2018, doi: 10.1109/SMELEC.2018.8481307.
- [77] N. Das, H. Wongsodihardjo, and S. Islam, “Photovoltaic cell modeling for maximum power point tracking using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672819.
- [78] “¿Qué es la apertura en la fotografía? | Adobe.” Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.adobe.com/pe/creativecloud/photography/discover/aperture.html>
- [79] R. H. French, A. M. Karimi, J. L. Braid, and J. S. Fada, “Training & Testing EL Image Dataset for Machine Learning,” 2019, doi: 10.17605/OSF.IO/QT5HJ.