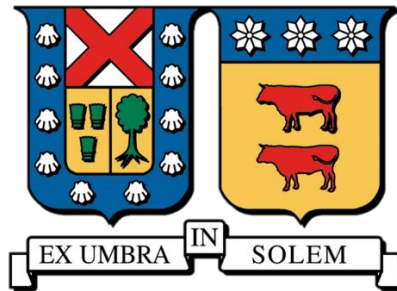


Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Mecánica

Campus Santiago San Joaquín



“Diseño de laboratorio solar fotovoltaico indoor para ensayos de electroluminiscencia.”

Matías Ignacio Sánchez Cabeza

Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico

Profesor guía: Dr. Ing. Rodrigo Barraza Vicencio

Profesor correferente: Ing. Federico Castillo Burns

Junio de 2021

Agradecimientos y Dedicatoria

Agradezco al profesor Rodrigo, a Federico, Robinson, Carlos, Ignacio y a todo el equipo FONDEF por permitirme ser parte del proyecto, darme siempre apoyo cuando lo necesité y acompañarme en esta última etapa de mi formación académica.

I would also like to thank Dr. Peter Hacke and Dr. Bengt Jackel for giving me fast and accurate response to important inquiries that came up during my work.

Agradezco también a todos mis amigos y amigas, que me dieron su apoyo de diferentes maneras durante mi vida universitaria, la cual incluyó los momentos más difíciles. Y por supuesto a Joyce, mi compañera, quien ha sido un pilar importantísimo en mi vida estos últimos años.

Doy especial agradecimiento a mis padres Laura y Juan Carlos por creer en mí, por sus sacrificios y por apoyarme incondicionalmente. También a mis hermanos Carla y Agustín por soportarme.

Finalmente, le dedico este trabajo a mi abuelita Carmen, que de seguro me está mirando orgullosa desde algún lugar.

Resumen (español)

En el presente documento se detalla el trabajo realizado para elaborar el diseño de un laboratorio fotovoltaico de interiores acondicionado para ensayos de electroluminiscencia. Para esto se hace el estudio del fenómeno físico, las bases de fotografía y los estándares fijados por la norma IEC 60904-13. El diseño del laboratorio incluye el desarrollo de una metodología de ensayo adaptada a su infraestructura y un modelo de procesamiento/análisis cualitativo de imágenes, creado en base a un modelo de aprendizaje de máquinas.

Abstract (english)

In this document details the work performed for the elaboration of a photovoltaic indoor laboratory, suitable for electroluminescence imaging. To develop this, a research for the electroluminescence effect, imaging basics and the IEC 60904-13 standard is performed. The lab design includes the development of a methodology adapted to the available infrastructure. Additionally, includes an image processing/analysis methodology, based on a machine learning model.

Glosario

- EL: Electroluminiscencia.
- FV: Fotovoltaico.
- Indoor: Espacio cerrado, interior.
- ERNC: Energías renovables no convencionales.
- CONICYT: Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica.
- ANID: Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo.
- FONDEF: Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico.
- SEN: Sistema Eléctrico Nacional.
- CORFO: Corporación de Fomento de la Producción.
- ACERA: Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento.
- IEC: *International Electrotechnical Commission*, Comisión Internacional de Electrotecnia.
- I_{sc} : *Short Circuit Current*, Corriente de Corto Circuito.
- V_{oc} : *Open Circuit Voltage*, Voltaje de Circuito Abierto.
- P_{mpp} : *Power at Maximum Power Point*, Potencia en el Punto de Máxima Potencia.
- V_{mpp} : *Voltage at Maximum Power Point*, Voltaje en el Punto de Máxima Potencia.
- I_{mpp} : *Current at Maximum Power Point*, Corriente en el Punto de Máxima Potencia.
- PID: *Potential-Induced Degradation*, Degradación por Potencial Inducido.
- LED: *Light-Emitting Diode*, Diodo Emisor de Luz.
- CIGS: Cobre-Indio-Galio-Selenio.
- IR: Infrarrojo.
- TC: *Technical Committee*, Comité técnico.
- S: “*Sharpness*”, indicador de nitidez de imágenes
- SNR: “*Signal to Noise Ratio*”, indicador de ruido en imágenes
- USM: Universidad Técnica Federico Santa María
- Corriente DC: Corriente eléctrica continua
- Corriente AC: Corriente eléctrica alterna

- CNN: *Convolutional Neural Network*, Red Neuronal Convolutacional
- ISO: *International Organization for Standardization*, Organismo Internacional de Normalización.
- AT: Alta tensión, alto voltaje.

Índice de Contenidos

Agradecimientos y Dedicatoria.....	3
Resumen (español).....	4
Abstract (english).....	4
Glosario.....	5
1. Introducción.....	18
2. Objetivos.....	19
2.1. Objetivo General:.....	19
2.2. Objetivos Específicos:.....	19
3. Estado del Arte.....	20
3.1. ERNC y el Potencial Solar en Chile.....	20
3.2. Energía Solar Fotovoltaica.....	22
3.3. Semiconductores:.....	24
3.4. Estado de Salud de Módulos.....	25
3.4.1. Inspección Visual.....	25
3.4.2. Trazado de Curva IV.....	26
3.4.3. Termografía.....	28
3.5. Electroluminiscencia.....	29
3.6. Fotografía.....	36
3.6.1. Sensor.....	36
3.6.2. Lente.....	37
3.6.3. Distancia Focal.....	37
3.6.4. Campo de Visión (<i>Field of View</i> , FOV).....	37
3.6.5. Profundidad de Campo (<i>Depth of Field</i> , DOF).....	37
3.6.6. Resolución.....	37

3.6.7. Ruido	37
3.6.8. Formato “raw”	38
3.6.9. Viñeteo	38
3.6.10. Eje Óptico.....	38
3.6.11. ISO	38
3.6.12. Apertura (f).....	39
3.6.13. Tiempo o velocidad de exposición.....	39
3.7. Estándares Internacionales: IEC 60904-13:2018	40
3.7.1. Sensor de la cámara	41
3.7.2. Lente de la cámara.....	41
3.7.3. Filtro de la cámara	41
3.7.4. Ambiente de estudio	41
3.7.5. Fuente de poder	42
3.7.6. Interfaz de computadora con cámara y fuente de poder:.....	42
3.7.7. Software de procesamiento y visualización de imágenes	42
3.7.8. Seguridad y manejo de dispositivos eléctricos.....	43
3.7.9. Posición y calibración de la cámara	43
3.7.10. Intensidad de la imagen	44
3.7.11. Ajustes de cámara recomendados.....	44
3.7.12. Comparación entre módulos.....	44
3.7.13. Montaje y captura de imágenes	45
3.7.14. Corrección de imagen.....	46
3.7.15. “ <i>Sharpness</i> ”:.....	46
3.7.16. “ <i>Signal to Noise Ratio</i> ” SNR:	50
3.7.17. Interpretación y Estudio Cuantitativo de Imágenes EL.....	52

3.7. Electroluminiscencia para Sistemas Fotovoltaicos en Chile.....	56
3.8. Análisis de Imágenes por Aprendizaje de Máquinas	57
4. Laboratorio Indoor de EL para Módulos FV	59
4.1. Directrices Generales	59
4.2. Espacio Destinado para la Implementación	61
4.3. Requerimientos Estructurales del Laboratorio.....	63
4.3.1. Requerimientos de Espacio	63
4.3.2. Requerimientos para Condición de Oscuridad.....	65
4.3.2. Requerimientos para Control de Variables Ambientales	65
4.4. Implementos para el Laboratorio	67
4.4.1. Fuente de Poder	67
4.4.2. Cámara EL y Disparador.....	68
4.4.3. Trípode de Cámara EL	69
4.4.4. Estructura de Soporte de Módulos FV	70
4.4.5. Sensor de Temperatura o Termostato	72
4.4.6. Amperímetro	73
4.4.7. Voltímetro	73
4.4.8. Cortinas Blackout.....	73
4.4.9. Unidades de Enfriamiento.....	73
4.4.10. Estante para Instrumentación	74
4.5. Diseño de Laboratorio Indoor de EL para Módulos FV	74
5. Metodología del Ensayo de EL Indoor para Módulos FV	80
5.1. Definición del ensayo.....	80
5.2. Alcances del Ensayo	81
5.3. Pruebas Preliminares.....	82

5.4. Metodología Paso a Paso	89
5.4.1. Primera parte, Preparación / Set Up:	89
5.4.2. Segunda parte, realización de capturas:	91
5.4.3. Tercera parte, elaboración de reporte	91
5.5. Consideraciones Importantes	92
6. Metodología de Procesamiento y Análisis Cualitativo de Imágenes EL para Caracterización de Módulos FV	93
6.1. Definición y Alcances de la Metodología	93
6.2. Base de Datos	95
6.3. Metodología de Procesamiento de Imágenes de EL	96
6.3.1. Procedimiento de Preparación	97
6.3.2. Separación de Imágenes en Celdas	99
6.3.3. Análisis de Imágenes	99
6.3.4. Caracterización del Módulo	100
7. Conclusiones	102
8. Recomendaciones	103
9. Referencias	104
10. Anexos	107
10.1. Tamaños de Módulos FV en la Industria	107
10.2. Código de Entrenamiento y Validación de Modelo de Aprendizaje de Máquinas para Caracterización Binaria de Celdas Fotovoltaicas	109
10.2.1.	109
10.2.2.	109
10.2.3.	109
10.2.4.	109
10.2.5.	110

10.2.6.....	110
10.2.7.....	110
10.2.8.....	111
10.2.9.....	111
10.2.10.....	111
10.2.11.....	111
10.2.12.....	112
10.2.13.....	112
10.2.14.....	112
10.2.15.	
<pre>#Guardar modelo entrenado ensayo.save('Modelo_Entrenado/ensayo.h5')</pre>	
.....	112
10.3. Código de Ampliación de Volumen de Data para Imágenes de Celdas FV ensayadas por EL.....	112
10.3.1.....	112
10.3.2.....	113
10.3.3.....	113
10.3.4.....	113
10.4. Código de Metodología de Procesamiento y Análisis Cualitativo para Imágenes de EL en módulos FV	114
10.4.1.....	114
10.4.2.....	114
10.4.3.....	114
10.4.4.....	115
10.4.5.....	115
10.4.6.....	115

10.4.7.....	115
10.4.8.....	116
10.4.9.....	116
10.4.10.....	116

Índice de Tablas

Tabla I. Clasificación de la conductividad de un material (Nelson, 2002)	25
Tabla II. Fallas típicas según IEC61215 e IEC61646 (International Energy Agency, 2014)	26
Tabla III. Materiales de Sensores y su Respectivo Rango de Longitud de Onda Sensible (International Energy Agency, 2018)	41
Tabla 4. Clases de nitidez, ejemplos y características distinguibles. (International Electrotechnical Commission, 2018)	49
Tabla V	107
Tabla VI	107
Tabla VII	108
Tabla VIII	108

Índice de Figuras

Figura I. Capacidad Instalada en Chile desde el año 2000 (Generadoras de Chile, 2019).....	21
Figura II. Mapa de Radiación Solar Norte de Chile (Ministerio de Energía, 2020)... ..	22
Figura III. Planta Fotovoltaica en la Región de Atacama, Chile (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Gobierno de Chile, 2017).	23
Figura IV. Bandas de Energía y Tipos de Materiales	24
Figura V. Curva IV y Principales Parámetros (International Energy Agency, 2014). ..	27
Figura VI. Captura con termografía y captura normal de módulos sombreados (International Energy Agency, 2018).	29
Figura VII. Espectro de emisión EL para (a) Silicio, (b) CIGS y (c) Telururo de Cadmio (Thin-film cell). (International Electrotechnical Comission, 2018)	29
Figura VIII. Esquema del Efecto FV y la EL.....	30
Figura IX. Representación de EL en un semiconductor p-n (Salazar-Peralta, 2018). ..	30
Figura X. Captura Normal y Captura EL de un Módulo Monocristalino (International Energy Agency, 2018).....	31
Figura XI. Curva IV de un módulo FV cuando está en oscuridad. Se destaca el caso de la polarización directa.....	32
Figura XII. Captura EL de Celdas FV con Cracking Tipo A (Izquierda) y Tipo B (derecha). (International Energy Agency, 2014).....	33
Figura XIII. Captura EL de Celdas con Cracking Tipo C, sometidas a corrientes de 10% de la Isc (izquierda) e Isc (derecha) (International Energy Agency, 2014).	33
Figura XIV. Captura EL de Celdas con Fallas en Dedos, producidas por cracking (izquierda) y por soldadura (derecha) (International Energy Agency, 2014).....	34
Figura XV. Captura EL de Módulo FV con Corrosión por Filtraciones de Humedad en sus Celdas (Górriz, 2014)	34
Figura XVI. Captura EL de Módulo con PID, sometido a corrientes de 10% de la Isc (izquierda) e Isc (derecha) (International Energy Agency, 2014).	35
Figura XVII. Captura EL de Celdas con Belt Marks (International Electrotechnical Comission, 2018).....	36

Figura XVIII. Captura EL de Celdas con Exceso de Impurezas (International Electrotechnical Commission, 2018).....	36
5. Figura XIX. Representación de conceptos básicos de fotografía (Hollows, 2005). 38	
Figura XX. Diagrama Explicativo de la Sensibilidad ISO (Condés, 2019).....	39
Figura XXI. Diagrama Explicativo de la Apertura del Diafragma (Condés, 2019). ..	39
Figura XXII. Diagrama Explicativo de la Velocidad de Obturación (Condés, 2019).	40
Figura XXIII. Imágenes EL y de Luz Extraviada (Módulo Sin Corriente) con sus Respectivos Histogramas y el Resultado de Sustracción de Imágenes (Imagen c) comparado con EL en condiciones ideales (Imagen d). (International Electrotechnical Commission, 2018).....	43
Figura XXIV. Imagen EL de una celda FV con los bordes agregados. (International Electrotechnical Commission, 2018).....	47
Figura XXV. Imagen de gradiente de borde, aplicando la primera derivada ortogonal G_x, y a la región destacada de la Figura XXIV. (International Electrotechnical Commission, 2018).....	47
Figura XXVI. Extracto de la imagen EL de la Figura XXIV y su gráfico de valores de intensidad a lo largo de L_2 . (International Electrotechnical Commission, 2018).	48
Figura XXVII. Imagen EL con $SNR_{50} \geq 45$. (International Electrotechnical Commission, 2018).....	51
Figura XXVIII. Imagen EL con $SNR_{50} \geq 15$. (International Electrotechnical Commission, 2018).....	52
Figura XXIX. Imagen EL con $SNR_{50} \geq 5$ (International Electrotechnical Commission, 2018).....	52
Figura XXX. Captura EL realizada outdoor a un grupo de módulos montados sobre el techo de una instalación (International Energy Agency, 2018).....	59
Figura XXXI. Detalle de la captura EL en Figura XXX, a la izquierda un módulo de la fila superior del grupo, a la derecha un módulo de la fila inferior (International Energy Agency, 2018).	60
Figura XXXII. Layout actual del espacio en el Laboratorio AT, se observa la Jaula de Faraday. Dimensiones de longitud en milímetros [mm].	62

Figura XXXIII. Vista frontal exterior de la Jaula de Faraday en el Laboratorio AT..	63
Figura XXXIV. Variac Trifásico.	68
Figura XXXV. Ejemplo de Cámara fotográfica profesional + lente. A la derecha una foto del disparador remoto (vía cable) compatible.	69
Figura XXXVI. Ejemplo de trípode de cámara profesional.	70
Figura XXXVII. Detalle la parte superior de la estructura de soporte de módulos, ganchos de soporte y perfil de una de las columnas principales.	71
Figura XXXVIII. Se observa la estructura de soporte de módulos desde la perspectiva de quien realiza el ensayo.	72
Figura XXXIX. Vista isométrica de la estructura.....	72
Figura XL. Layout actual del espacio en el Laboratorio AT, se observa la Jaula de Faraday y su espacio aledaño, se aprecian en rojo las modificaciones solicitadas a la jaula. Dimensiones de longitud en milímetros [mm].	75
Figura XLI. Vista acotada del Laboratorio EL Indoor Modelo 3D SketchUp.....	76
Figura XLII. Vista acotada del Laboratorio EL Indoor. Modelo 3D SketchUp	77
Figura XLIII. Vista superior del Laboratorio EL Indoor. Modelo 3D SketchUp	78
Figura XLIV. Detalle de equipos eléctricos, iluminación y pasacables del Laboratorio EL Indoor. Modelo 3D SketchUp	79
Figura XLV. Captura de módulo bajo luz natural (escala de grises), en ambiente interior oscuro, pero con puerta abierta.	84
Figura XLVI. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{SC} . Parámetros: ISO 100 - Apertura f/4 - Tiempo de Exposición 20 segundos.....	84
Figura XLVII. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{SC} . Parámetros: ISO 500 - Apertura f/5 - Tiempo de Exposición 25 segundos.	85
Figura XLVIII. Captura de módulo bajo luz natural (escala de grises), en ambiente interior oscuro, pero con puerta abierta.	86
Figura XLIX. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{SC} . Parámetros: ISO 100 - Apertura f/5 - Tiempo de Exposición 60 segundos.....	86
Figura L. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{SC} . Parámetros: ISO 500 - Apertura f/5 - Tiempo de Exposición 25 segundos.....	87
Figura LI. Captura normal de módulo en ambiente iluminado.	87

Figura LII. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{SC} . Parámetros: ISO 100 - Apertura f/4 - Tiempo de Exposición 20 segundos.....	88
Figura LIII. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{SC} . Parámetros: ISO 500 - Apertura f/4 - Tiempo de Exposición 40 segundos.....	88
Figura LIV. Representación simplificada de la configuración de equipos de medición y el módulo FV (F. A. Lindholm, 1979)	90
Figura LV. Imagen de EL de celdas con cracking, a la izquierda se ve una celda con 3 bus bars y a la derecha una celda con solo 2 de ellas.	94
Figura LVI. Imagen de EL de celdas sin cracking, a la izquierda se ve una celda con 3 bus bars y a la derecha una celda con solo 2 de ellas.	94
Figura LVII. Imagen de EL de celdas, a la izquierda se ve una celda de bus bars con patrón dash line y a la derecha una celda de bus bars con espesor continuo.....	94
Figura LVIII. Overview de la muestra completa de imágenes de celdas ensayadas por EL, si bien en esta vista no se representa de esa forma, el total de imágenes se encuentra en escala de grises.	95
Figura LIX. Diagrama explicativo de la metodología de análisis de imágenes.....	97
Figura LX. Ejecución del algoritmo de normalización de imágenes EL de módulos FV, bajo el bloque de programación se observan los puntos previamente marcados en la ventana emergente del programa.	98
Figura LXI. Visualizador de imagen EL original ingresada al algoritmo.....	98
Figura LXII. Visualizador de imagen EL normalizada (corregida) al algoritmo.	99
Figura LXIII. Bloque de programación ejecutado con el diagnóstico de las 4 celdas del módulo de las Figuras LXI y LXII	100
Figura LXIV. Imágenes EL de celdas FV generadas por el algoritmo, con su respectivo identificador de módulo y ubicación.....	100
Figura LXV. Diagnóstico final del módulo, en base al diagnóstico de sus celdas. ..	101

1. Introducción

Durante los últimos años Chile ha experimentado un importante crecimiento en materia de energía solar FV. Los últimos reportes indican que desde el año 2014 la potencia instalada de este tipo de ERNC ha aumentado considerablemente, llegando actualmente a un 11,1% del total de la matriz, que corresponden a 2.793 MW (Generadoras de Chile, 2019).

El aumento de este mercado hace surgir la necesidad de que las plantas cumplan con estándares más rigurosos, principalmente que cuenten con planes de mantenimiento que aseguren que las plantas mejoren su disponibilidad y reduzcan sus costos de operación. En este contexto, la Universidad Técnica Federico Santa María se adjudicó un fondo brindado por CONICYT (actualmente ANID) con el objetivo de desarrollar un plan de mantenimiento para esta industria.

En el plan de mantenimiento antes mencionado, las herramientas para detectar modos de falla y diagnosticar el estado de salud de los módulos juega un papel fundamental. Actualmente existe un grupo de cuatro métodos que son los más desarrollados a la fecha, todos se pueden complementar entre sí, ya que presentan ventajas y desventajas respecto a los otros, además de distintos tipos de falla que son capaces de detectar. El ensayo de electroluminiscencia es parte de este grupo y para continuar con su investigación dentro de la universidad, se requiere de un laboratorio para ensayos en un ambiente interior controlado, con su respectiva metodología de ensayo.

El ensayo de EL tiene características que le permiten ser realizado en grandes muestras de módulos, por lo que sus resultados pueden formar grandes cantidades de datos. Dicho esto, es necesario desarrollar metodologías que permitan el análisis cualitativo de estos datos, de la manera más atractiva para potenciales clientes en la industria.

2. Objetivos

2.1.Objetivo General:

El objetivo principal es diseñar un laboratorio indoor, acondicionado para ensayos de electroluminiscencia.

2.2.Objetivos Específicos:

Para cumplir el objetivo general mencionado, se deben considerar los siguientes objetivos específicos:

- Revisar el estado del arte relacionado con la investigación del ensayo de EL y su actual aplicación en la industria.
- Generar una metodología, en base a los estándares mencionados y la información recopilada, para la realización del ensayo.
- Diseñar el laboratorio para ensayos de EL, según lo recomendado por los estándares internacionales.
- Desarrollar e implementar una metodología para el procesamiento y análisis cualitativo de imágenes de EL, que permita trabajar grandes bases de datos mediante un algoritmo de aprendizaje de máquinas, para la detección de cracking.

3. Estado del Arte

En cuanto al contexto correspondiente a esta línea de investigación, es importante señalar el escenario actual de las energías renovables no convencionales, haciendo énfasis en la solar fotovoltaica. Luego, se toma un enfoque orientado a lo investigativo, para llegar a abordar el ensayo de electroluminiscencia en interiores. Una vez llegando a dicho tópico, se profundiza en la base teórica, los laboratorios existentes, los estándares internacionales vigentes, las investigaciones desarrolladas y los análisis de resultados en términos cualitativos y cuantitativos.

3.1. ERNC y el Potencial Solar en Chile

Durante la crisis del petróleo en Arabia de los años 80, países de la Unión Europea como Dinamarca, Alemania y España, se comenzaron a tomar políticas de incentivo a las energías renovables con el fin de librarse de la dependencia de este recurso en su mercado energético. De esta forma ocurrió el inicio del crecimiento de esta industria en esa parte del mundo. Durante los años 2000 estas políticas se consolidaron, ya que se fueron dando cada vez más escenarios que provocaban la necesidad de seguir desarrollando estas fuentes de energía. Por ejemplo, planes antinucleares de la matriz energética o el cambio climático (el cual resulta el factor aparentemente más relevante).

Dichas políticas de incentivo fueron copiadas en Latinoamérica, en Chile se hizo lo propio el año 2010, cuando comenzó a regir la Ley 20.257 de Energías Renovables no Convencionales. Esta ley estableció diversas facilidades a las generadoras ERNC. Por ejemplo: la obligación a las empresas con capacidad instalada sobre 200 [MW] de certificar que el 10% de esa potencia provenga de energías renovables, flexibilidades de acreditación y subsidios CORFO para proyectos de nuevas instalaciones (Sauma, 2012).

Esta ley, seguida de otras medidas posteriores, llevaron al SEN (99,3% de la capacidad total de Chile) a tener actualmente una potencia instalada de 12.254 [MW] lo que claramente representa un progreso en la descarbonización de la matriz y en el aprovechamiento del gran potencial del país en ERNC. Si se compara con el aumento de la potencia instalada total en la matriz, la cantidad de proyectos ERNC que se han implementado le han seguido el paso (Figura I), ya que actualmente la cifra señalada corresponde al 48,7% del total.

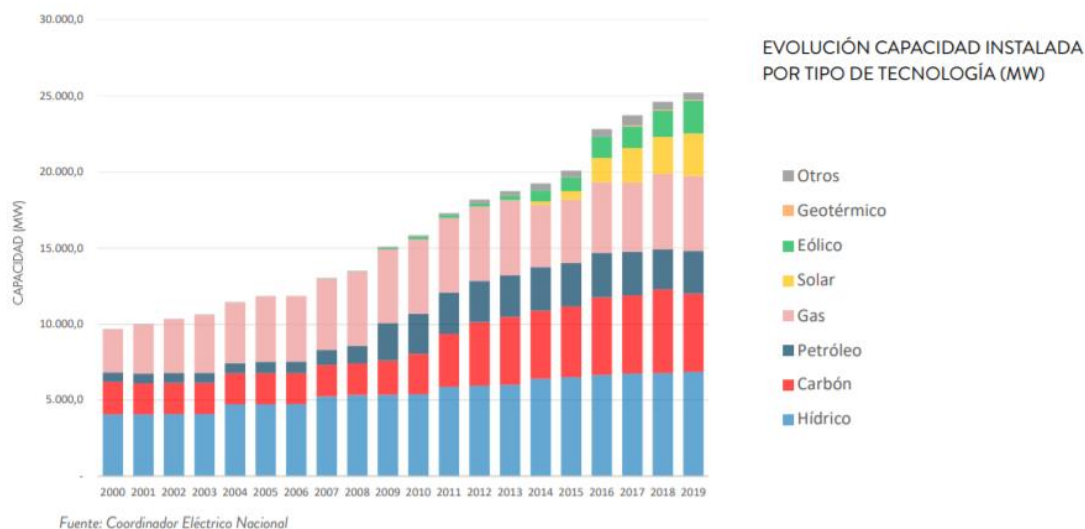


Figura I. Capacidad Instalada en Chile desde el año 2000 (Generadoras de Chile, 2019).

Dado este contexto de crecimiento de las ERNC en Chile, cuando se trata de energía solar, el potencial en el país es particularmente alto. Específicamente en el sector centro y norte del país, existen zonas con un promedio anual cercanos a 7,5 [kWh/m²/día] (Ministerio de Energía, 2020), de las cuales la mayor parte corresponde a desierto (Figura II). Este escenario permite aseverar que se debe seguir incentivando este sector del mercado energético nacional.

Dentro de los proyectos realizados en Chile destacan:

- Planta Fotovoltaica El Romero Solar, con una potencia nominal de 196 MW, una de las más grandes en Latinoamérica. Actualmente operativa (Acciona Chile, 2020)
- Central Termosolar Cerro Dominador, que cuenta con una planta fotovoltaica de 100 [MW] y una planta de concentración solar, la cual es una tecnología de energía solar térmica, de 110 [MW]. Esta última se estima que entre en operación a fines de 2020 (EIG Global Energy, 2020).

Existen actualmente casi una decena de proyectos termosolares aprobados, de los cuales 5 son de mayores dimensiones que Cerro Dominador. En cuanto a proyectos fotovoltaicos existen más de 20 proyectos en construcción con potencia instalada sobre los 100 [MW] (ACERA, 2020).

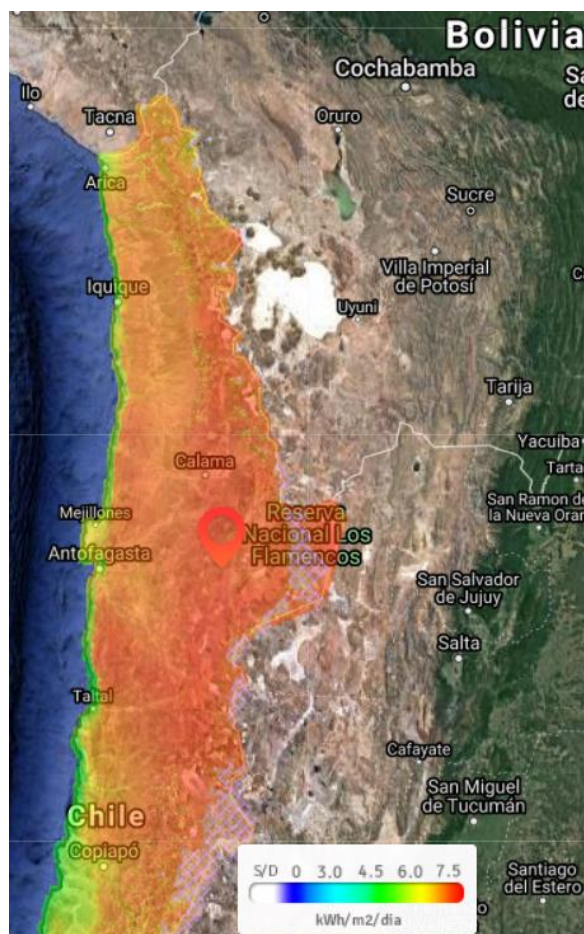


Figura II. Mapa de Radiación Solar Norte de Chile (Ministerio de Energía, 2020).

Este escenario permite aseverar que existe y seguirá existiendo la necesidad de desarrollar mejores tecnologías y mejores estándares de funcionamiento para las plantas de energía solar, lo que implica que los planes de mantenimiento y su área de investigación asociada cumplirá una labor fundamental en el correcto desarrollo del mercado energético del país.

3.2. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es un tipo de ERNC que aprovecha la energía proveniente del sol que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética, y la convierte en energía eléctrica. Las aplicaciones de esta energía se aplican en distintas escalas, se puede utilizar para la alimentación de luminarias públicas o equipos de terreno, en los tejados de casas o instalaciones industriales, también es utilizada como fuente de energía para satélites y para medios de transporte. Como medio de generación

de energía a un sistema interconectado, existen plantas fotovoltaicas de gran escala. Estas se instalan en planicies abiertas, ya que cualquier sombra tiene efectos negativos en la producción. Su ubicación debe ser en lugares con altos niveles de radiación, lo cual puede medirse mediante variables como la irradiancia, la cual se mide en $[W/m^2]$ y cuantifica la potencia que llega por unidad de área en un instante dado. Sin embargo, lo más determinante al momento de estudiar la factibilidad de una instalación fotovoltaica es la energía por unidad de área y por día $[kWh/m^2/día]$.

Como se observa en la Figura III, las plantas se componen de un gran número de paneles o módulos fotovoltaicos, los cuales pueden tener una posición fija, optimizando el aprovechamiento de la radiación que recibe el área a lo largo del día, o puede tener un sistema de “trackers”, los cuáles cambian el ángulo en uno o más planos para poder mantener al módulo lo más perpendicular al sol durante el día. Las plantas de grandes dimensiones suelen abarcar grandes terrenos, una planta de 100 [MW] cuenta con decenas de miles de paneles.



Figura III. Planta Fotovoltaica en la Región de Atacama, Chile (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Gobierno de Chile, 2017).

Los módulos o paneles, a su vez, se componen de varias celdas conectadas en serie y en paralelo. Las celdas se encuentran en una de las muchas capas que componen el módulo, que protegen de distintos tipos de agentes externos a las celdas y sus conexiones. Las capas están superpuestas entre sí, un marco externo de aluminio es el

cuerpo que le da la rigidez necesaria al conjunto. Las celdas fotovoltaicas más utilizadas en la actualidad son básicamente láminas delgadas de silicio cristalino (c-Si), ya sea de silicio policristalino (multi-Si) o monocristalino (mono-Si). Sin embargo, las nuevas tecnologías son de otros materiales como silicio amorfo (a-Si), como es el caso de las celdas de película delgada o “thin-film cell”.

El silicio y todos los materiales con los que se hacen celdas fotovoltaicas son de tipo semiconductor. Es importante profundizar en este punto ya que en estos materiales se produce tanto el efecto fotovoltaico como la electroluminiscencia. El efecto fotovoltaico consiste en que los fotones de la radiación solar excitan los electrones del material, lo que les permite liberarse de su átomo y, en presencia de un campo eléctrico, producir una corriente eléctrica.

3.3. Semiconductores:

Cuando los átomos forman estructuras conjuntas, los niveles de energía de los electrones que los orbitan pasan a visualizarse como bandas de energía, es decir, de niveles de energía separados y discretos, pasan a ser considerados un espacio continuo. En estas bandas se cumple el mismo principio que en los niveles. Por lo tanto, un electrón que se encuentre en una banda cercana al núcleo de la estructura tendrá menos energía que uno que se encuentre en una banda más externa.

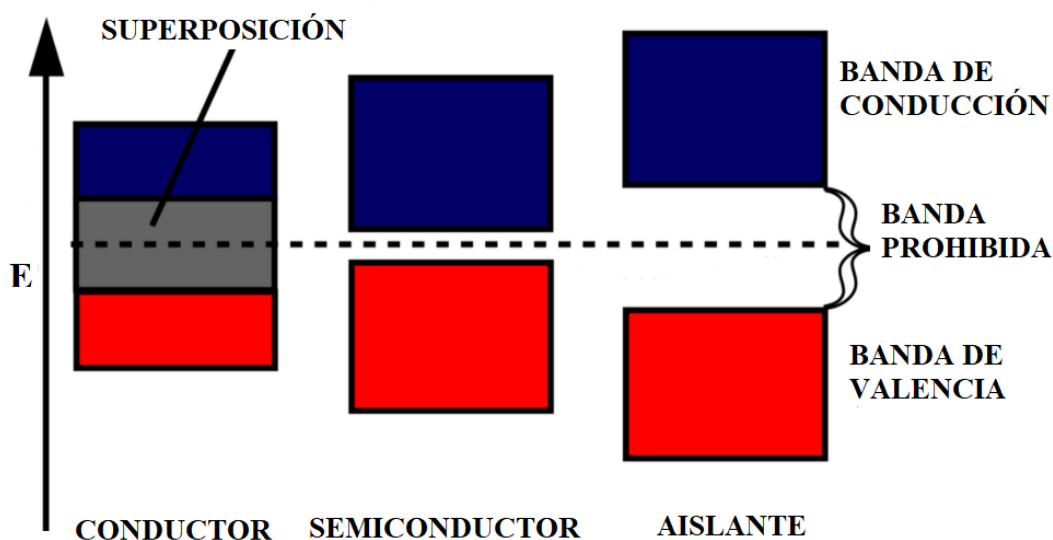


Figura IV. Bandas de Energía y Tipos de Materiales

La banda más externa se conoce como “banda de valencia”, en esta banda los electrones son más fáciles de remover. Si un electrón alcanza una banda más externa que esta, se dice que alcanza la “banda de conducción”. La diferencia de energía entre las bandas de valencia y de conducción se conoce como “band gap”, también conocida como “brecha prohibida”. El ancho de esta brecha prohibida define el tipo de material en términos de conductividad eléctrica (Figura IV), es decir, define si el material en cuestión es conductor, aislante o semiconductor (Tabla I).

Los materiales semiconductores pueden ser naturales, también llamados intrínsecos, o dopados, también llamados extrínsecos. Los dopados son a los que se le insertan impurezas (en pequeñas proporciones), éstos se pueden clasificar en “tipo p” o “tipo n”, cuando las impurezas tienen menos o más electrones en la banda de valencia que el material, respectivamente. Las celdas fotovoltaicas corresponden a una unión de ambos tipos, llamada “unión p-n”, el lado “tipo n” es el que se expone a la radiación solar para producir un flujo de electrones (o corriente eléctrica) hacia el lado “tipo p”.

Tabla I. Clasificación de la conductividad de un material (Nelson, 2002)

Clasificación	Ancho de Brecha
Conductor	< 0,5 [eV]
Semiconductor	0,5 [eV] – 3 [eV]
Aislante	> 3 [eV]

3.4. Estado de Salud de Módulos

Retomando lo mencionado anteriormente, la industria de generación de ERNC necesita contar con tecnologías de mantenimiento que aseguren su correcto funcionamiento. Dentro de este contexto, las herramientas para detectar fallas en módulos juegan un rol fundamental. Actualmente existen 4 métodos que han sido más utilizados y desarrollados:

3.4.1. Inspección Visual

La inspección visual es un método no invasivo de corta duración. Se puede aplicar antes o después de someter al módulo a pruebas de esfuerzos eléctricos,

ambientales o mecánicos en laboratorio. También se puede aplicar como control de calidad pre/post producción y para inspeccionar en terreno durante su vida útil.

La inspección visual sigue las normas IEC61215 e IEC61646, las cuales establecen que se deben tener mínimo 1000 [lux] de luminosidad al momento de realizarse, además estipulan que las fallas detectadas se consideran solamente si son visibles a ojo desnudo, es decir, sin ayuda de ningún tipo de lente o dispositivo que facilite la visión (International Energy Agency, 2014). Estos estándares mencionados separan los tipos de fallas según los sectores del módulo por inspeccionar (Tabla II).

Tabla II. Fallas típicas según IEC61215 e IEC61646 (International Energy Agency, 2014)

Componente del Módulo FV	Fallas en Módulo FV
Cara frontal del módulo	Burbujas, delaminada, decolorada, empardecida.
Celdas FV	Rotas, fracturadas, anti-reflejos decolorados.
Metalización de celdas FV	Quemadas, oxidadas
Marco	Doblado, roto, rayado, desalineado
Cara posterior del módulo	Burbujas, delaminada, empardecida, rayada, quemada
Caja de uniones	Suelta, oxidada, corroída
Cables - conectores	Despegados, quebradizos, partes eléctricas expuestas

3.4.2. Trazado de Curva IV

La medición de la curva IV es una gráfica que compara la corriente y el voltaje en un módulo FV cuando el voltaje o la corriente en el módulo varía con una fuente de energía externa. Los procedimientos para realizarlo están normados por la IEC60904-1. Es una prueba de corta duración no destructiva que requiere sacar al módulo de funcionamiento para conectarse al equipo que realiza el trazado (trazador de curvas IV). Además de la curva como tal, determina la corriente de corto circuito (I_{sc}) el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) del módulo y mide otros parámetros

importantes indirectamente. La I_{sc} corresponde a la corriente que circula por el módulo cuando el voltaje a través de la celda es cero. El V_{oc} es el voltaje máximo disponible de un módulo FV y ocurre a corriente cero. También se obtiene el punto de máxima potencia P_{mpp} , junto con su voltaje y corriente correspondiente, V_{mpp} e I_{mpp} , respectivamente (Figura V). Otro valor que puede obtenerse con el trazado es el “*Fill Factor*”, el cual es una medida directa de la calidad del módulo (International Energy Agency, 2014).

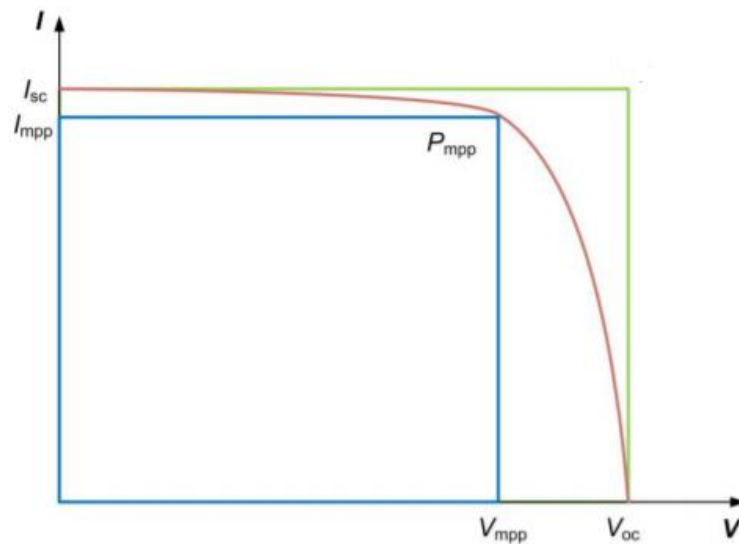


Figura V. Curva IV y Principales Parámetros (International Energy Agency, 2014)

Las irregularidades en las curvas y en los parámetros permiten identificar problemas en el módulo. Por ejemplo:

- Una I_{sc} menor a la esperada es muy probable que sea causada por pérdida de transparencia en capas del módulo debido a empardecimiento o decoloración.
- Un V_{oc} menor al esperado indica fallas en las interconexiones entre celdas. También puede significar que existe degradación por potencial inducido (PID), la cual se aborda en la sección 3.5.
- Un escalón en la gráfica puede implicar que hay celdas dañadas o desuniones en las mismas.

3.4.3. Termografía

La termografía es un fenómeno físico que consiste en la emisión de radiación, por parte de un cuerpo, debido a la energía asociada a su temperatura. Dicha radiación es principalmente en el espectro infrarrojo. Existen 3 tipos de termografía para detectar fallas en módulos fotovoltaicos, según sus nombres en inglés: *Pulse thermography*, la cual requiere una fuente externa de calor, en condiciones de laboratorio. *Lock-in Thermography*, que requiere una excitación de la muestra a una frecuencia sincronizada con la cámara térmica, en condiciones de laboratorio. *Thermography under steady state conditions*, el cual es el método más usado y simple, en el que se profundiza a continuación.

Thermography under steady state conditions, que puede ser traducida como “termografía bajo condiciones estacionarias” es una técnica de medición no destructiva, que puede realizarse en terreno con el módulo operativo. Se puede realizar a un módulo o a grandes grupos de ellos, sólo se debe garantizar que la medición se hace bajo condiciones estacionarias. La medición consiste en la captura de imágenes mediante una cámara térmica infrarroja, la cual registra la distribución de temperaturas en el módulo. El módulo debe ser excitado con luz o corriente, si se hace una medición bajo excitación solar, se deben cumplir ciertas condiciones de irradiancia (mínimo 700 [W/m²]), viento (baja velocidad) y temperatura (ambiente). La inspección a módulos y plantas FV en terreno usando termografía está definida por la norma IEC62446-3.

Este método permite visualizar regiones que estén más calientes que otras, ya sea un módulo completo, una fila de celdas, una celda, parte de ella o un área puntual. Estos casos pueden indicar modos de falla como circuito abierto / corto circuito del módulo, sombreadamiento (Figura VI), mala conexión del módulo, celdas defectuosas, celdas rotas, etc (International Energy Agency, 2014).

El cuarto método es el ensayo de electroluminiscencia, el cual se abordará en profundidad a continuación. Este ensayo cuenta con la Norma 60904-13 del año 2018. Dicho estándar constituye una guía del ensayo y fija las primeras directrices en la investigación de este fenómeno físico en las celdas fotovoltaicas.

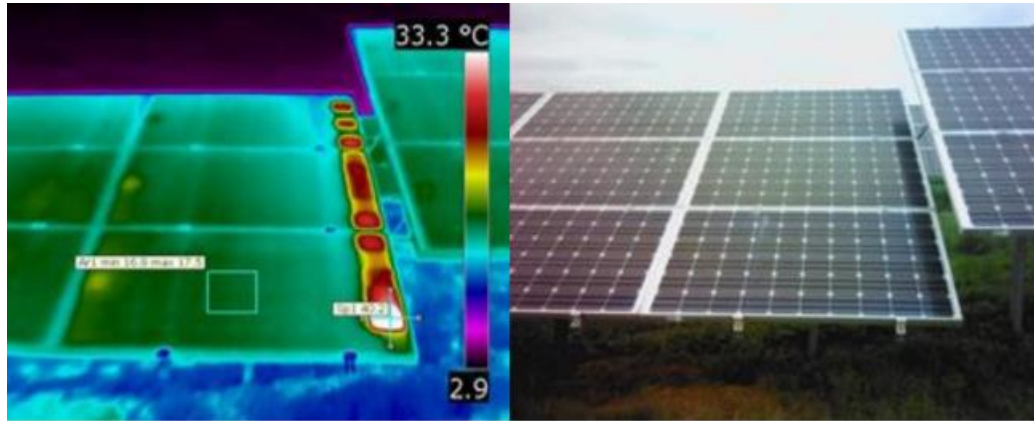


Figura VI. Captura con termografía y captura normal de módulos sombreados (International Energy Agency, 2018).

3.5. Electroluminiscencia

Al igual que el efecto fotovoltaico, la electroluminiscencia es un fenómeno físico que ocurre en materiales semiconductores al ser excitados con cierto voltaje. Consiste en la emisión de radiación infrarroja, la cual, comparada con la luz visible, es de baja intensidad. El espectro de emisión de los semiconductores puede variar, pero en los materiales usados para celdas fotovoltaicas siempre se encuentran principalmente en el espectro IR (Figura VII). Cabe señalar que el espectro infrarrojo corresponde a longitudes de onda mayores a aproximadamente 750 [nm].

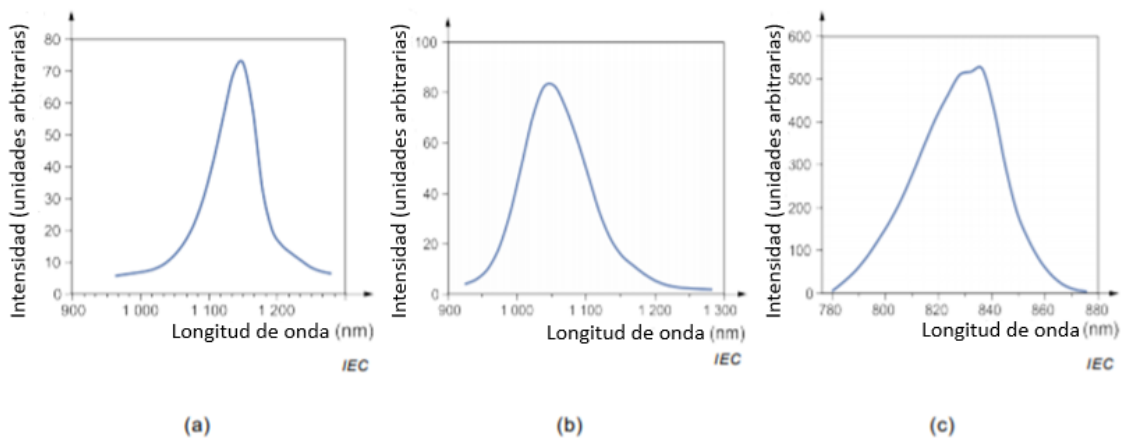


Figura – Espectro de emisión de electroluminiscencia por
(a) Si, (b) ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) [2], and (c) CdS/CdTe [3]

Figura VII. Espectro de emisión EL para (a) Silicio, (b) CIGS y (c) Telururo de Cadmio (Thin-film cell). (International Electrotechnical Commission, 2018)

En el caso de un módulo fotovoltaico se puede señalar que la EL consiste en el efecto inverso al fotovoltaico (Figura VIII) ya que las celdas, en vez de actuar como receptoras de energía, actúan como LED's.

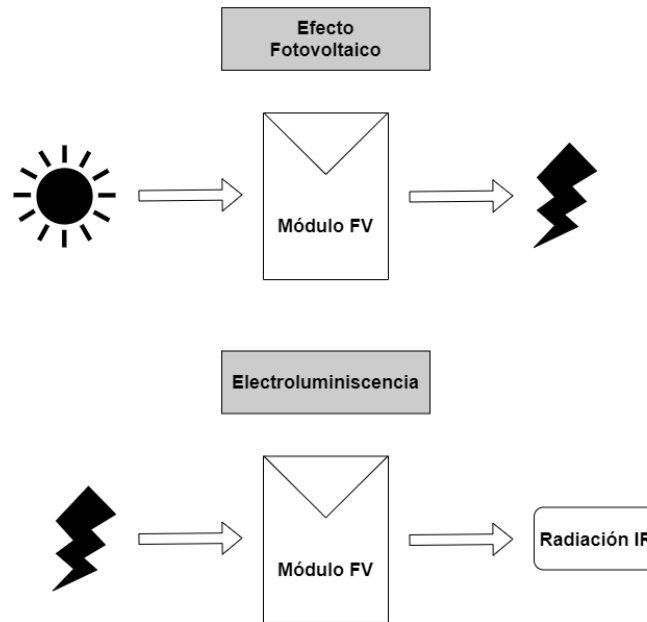


Figura VIII. Esquema del Efecto FV y la EL.

A nivel atómico el fenómeno corresponde a recombinación radiativa, que consiste en que los electrones cruzan la unión desde el material “tipo n” al “tipo p” (Figura IX) de la celda debido al campo eléctrico presente (producido por el voltaje inducido), lo cual libera algunos fotones en el rango IR (Salazar-Peralta, 2018).

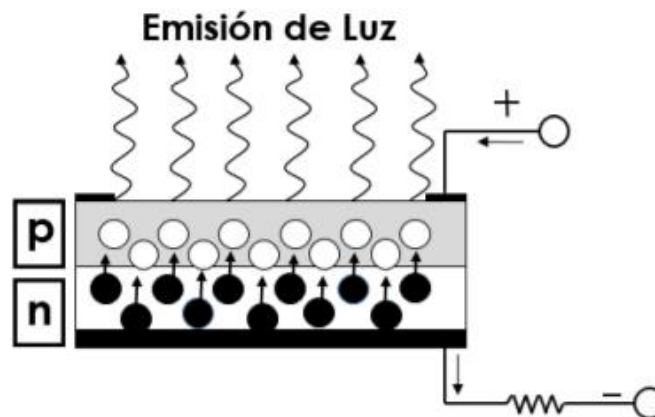


Figura IX. Representación de EL en un semiconductor p-n (Salazar-Peralta, 2018).

El ensayo de EL en sistemas FV es un ensayo no destructivo, a diferencia de la termografía o inspección visual, requiere sacar de funcionamiento al módulo para realizarse. Puede ser clasificado en ensayos de EL “*outdoor*” e “*indoor*”. El ensayo EL *outdoor* o en exteriores, puede ser realizado en terreno. Para el caso del ensayo en interiores o *indoor*, el módulo debe ser retirado a un laboratorio en condiciones controladas. Ambos, debido a su corta duración, pueden ser realizados a grandes muestras de módulos.

Debido a la baja intensidad de la luz IR, el ensayo de EL se debe realizar en condiciones de oscuridad (en el caso de EL *outdoor* se debe realizar de noche) para que una cámara acondicionada capture la luz emitida por las celdas (LED's) y generar una imagen que sea afectada en la menor medida posible por la contaminación lumínica en el espectro IR. Esta imagen permite visualizar detalles que no pueden (o no son fáciles de) ser apreciados con el ojo humano (Figura X). Por lo tanto, resulta una útil herramienta para determinar el estado de salud del módulo.

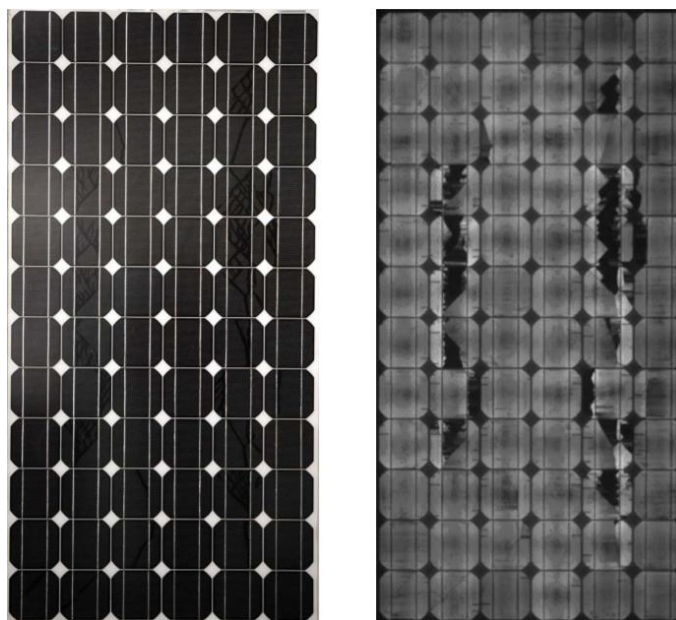


Figura X. Captura Normal y Captura EL de un Módulo Monocristalino (International Energy Agency, 2018).

El comportamiento de la curva IV del módulo en estas condiciones es distinta a la que tiene cuando está expuesto a la luz (Figura V, Figura XI). En este caso, la corriente que circula por el módulo es directamente proporcional al voltaje inducido. En la mayoría de los casos, alcanzando V_{oc} (o VCA por su sigla en español), circulará por el

módulo I_{sc} (o ICC por su sigla en español), en otros casos el voltaje requerido para llegar a dicha corriente es mucho mayor. Se observa, por el comportamiento de la curva, que mientras se aumenta el voltaje entregado por la fuente, la corriente va a pasar de aumentar muy lentamente a dispararse bruscamente desde cierto valor, lo cual es un factor por considerar para desarrollar el ensayo.

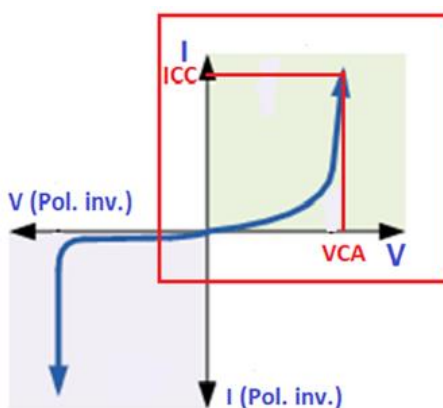


Figura XI. Curva IV de un módulo FV cuando está en oscuridad. Se destaca el caso de la polarización directa.

La norma IEC 60904-13 del año 2018 es el estándar que sirve como guía para realizar el ensayo y analizar las imágenes de manera cualitativa y cuantitativa. Considerando los alcances del análisis de las imágenes, el ensayo de EL en módulos FV tiene múltiples aplicaciones con fines académicos y de investigación, así como también en la industria fotovoltaica. Por ejemplo: pre y post ensayos de envejecimiento, control de calidad para procesos de manufactura, para verificar que no haya daños tras despachos o en puertos (previo a compras con grandes distribuidores). Algunos de los modos de falla que puede detectar el ensayo son:

- Fracturas o cracking de distintas categorías: Se considera cracking tipo A cuando la celda está fracturada, pero la fractura no afecta considerablemente el flujo de corriente. El cracking tipo B corresponde a fracturas que afectan el flujo de corriente, pero la celda sigue totalmente conectada (Figura XII).

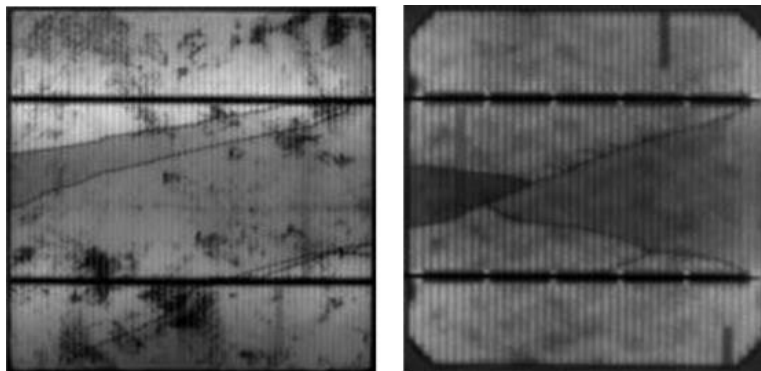


Figura XII. Captura EL de Celdas FV con Cracking Tipo A (Izquierda) y Tipo B (derecha). (International Energy Agency, 2014)

El caso más grave es el cracking tipo C, en el que la fractura aísla completamente partes de la celda (Figura XIII). Para detectar este problema, es necesario realizar dos capturas, una con el módulo a corriente I_{sc} y otra al 10% de I_{sc} .



Figura XIII. Captura EL de Celdas con Cracking Tipo C, sometidas a corrientes de 10% de la I_{sc} (izquierda) e I_{sc} (derecha) (International Energy Agency, 2014).

- Fallas en dedos de las celdas (los dedos son las líneas del material semiconductor que llevan la corriente a los “*bus bars*”, las cuales conectan en serie a las celdas de cada columna): Se pueden deber a cracking o a soldaduras (Figura XIV), se diferencian del cracking en que los sectores oscuros forman patrones lineales.

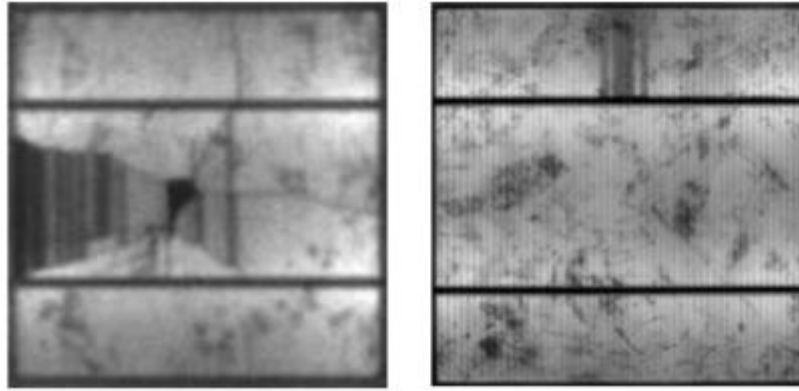


Figura XIV. Captura EL de Celdas con Fallas en Dedos, producidas por cracking (izquierda) y por soldadura (derecha) (International Energy Agency, 2014).

- Filtraciones de humedad y corrosión (Figura XV): La delaminación o daño mecánico del módulo expone parcialmente las celdas al ambiente, permitiendo filtraciones de humedad que dañan la metalización de las celdas, produciendo corrosión.

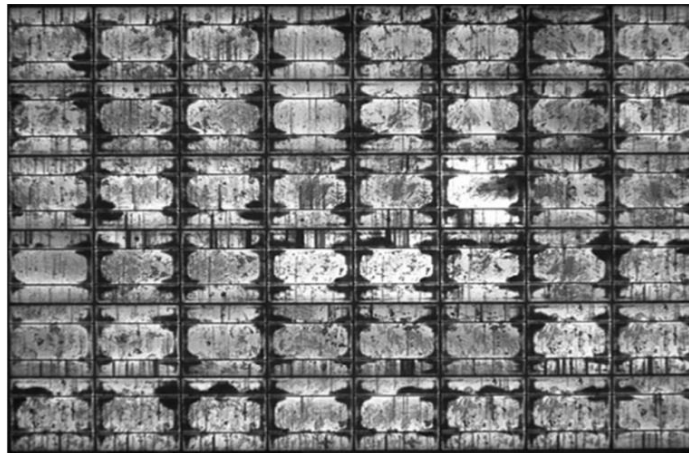


Figura XV. Captura EL de Módulo FV con Corrosión por Filtraciones de Humedad en sus Celdas (Górriz, 2014)

- Degradación por Potencial Inducido o PID (Figura XVI): Consiste en la degradación de las celdas producidas por corrientes parásitas originadas por la diferencia de potencial entre el módulo y el piso. Se visualiza con celdas que emiten luminosidad casi nula o mucho menor al de las demás celdas.

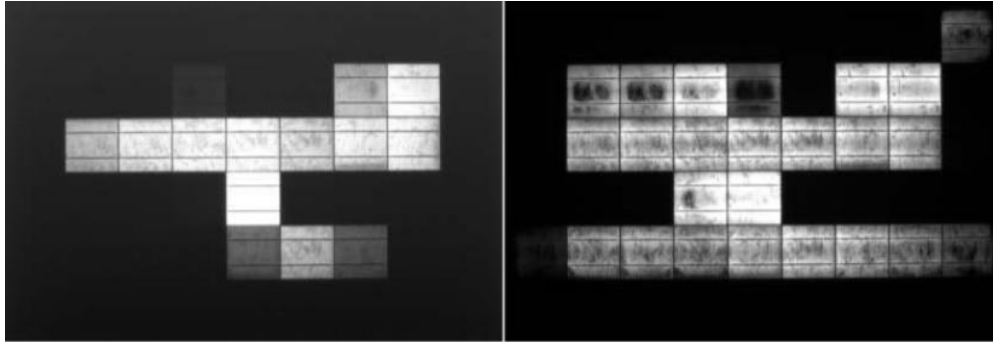


Figura XVI. Captura EL de Módulo con PID, sometido a corrientes de 10% de la I_{sc} (izquierda) e I_{sc} (derecha) (International Energy Agency, 2014).

- Problemas de manufactura.: Dentro de los más frecuentes están las “belt marks”, son marcas de las correas transportadoras que quedan en las celdas cuando parte del proceso no se hace correctamente (Figura XVII).

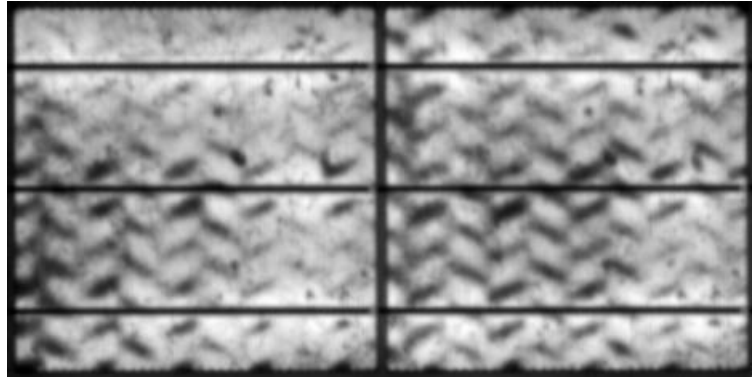


Figura XVII. Captura EL de Celdas con Belt Marks (International Electrotechnical Comission, 2018)

- Otro problema recurrente es el del exceso de impurezas (del dopaje del material) en algunos sectores de la celda. Estos problemas afectan considerablemente la eficiencia de los módulos nuevos (Figura XVIII). (International Electrotechnical Comission, 2018).

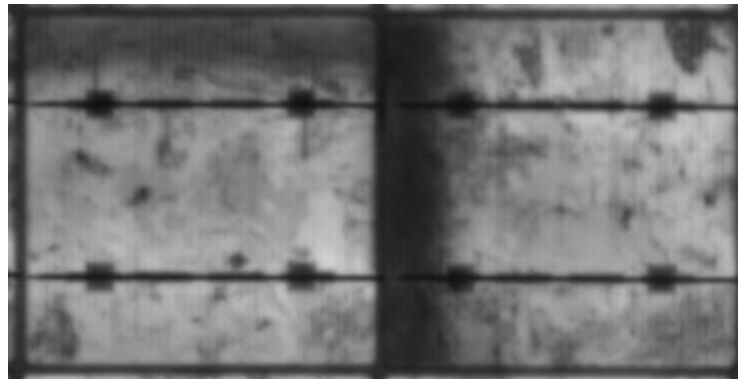


Figura XVIII. Captura EL de Celdas con Exceso de Impurezas (International Electrotechnical Comission, 2018)

3.6. Fotografía

Para el ensayo EL se requiere el uso de una cámara comercial, por lo que es necesario dominar ciertos conceptos de fotografía para poder seleccionar el equipamiento necesario (Figura XIX) y determinar algunos pasos de la metodología.

3.6.1. Sensor

Elemento propio de una cámara, fotográfica o de video, que detecta y captura la información que compone la imagen, convirtiendo las ondas de luz en señales eléctricas.

3.6.2. Lente

Dispositivo óptico que desvía los haces de luz que pasan a través de él, consiguiendo ampliar o reducir el tamaño del área que puede capturar el sensor (con la cámara en posición fija).

3.6.3. Distancia Focal

Como su nombre lo indica, es la distancia entre la parte frontal del lente y el objeto bajo inspección. Pueden tener un rango de valores (“*zoom*”) o un valor fijo.

3.6.4. Campo de Visión (*Field of View*, FOV)

Es el área visible del objeto bajo inspección, o la porción de una imagen que abarca el sensor de la cámara.

3.6.5. Profundidad de Campo (*Depth of Field*, DOF)

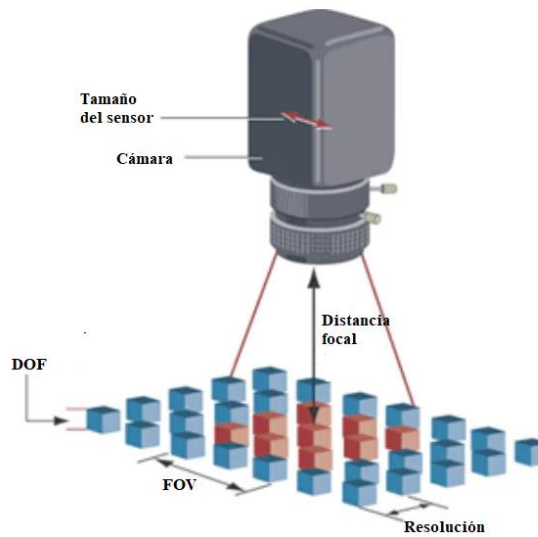
Es la capacidad del lente para mantener la calidad de la imagen cuando un objeto se acerca o se aleja del punto de enfoque óptimo.

3.6.6. Resolución

Cuantificación del número de detalles distinguibles en una imagen. Corresponde al número de píxeles, en dimensión horizontal o vertical de un arreglo ortogonal de píxeles. Dicho de otra forma, es la relación entre el FOV y el tamaño del detalle más pequeño distinguible en una fotografía.

3.6.7. Ruido

Efecto no deseado en una fotografía, consiste en la alteración arbitraria de color y brillo en una captura, alterando en ciertos píxeles la luminancia y tonalidad real de la imagen (Zafra, 2020).



4.

5. *Figura XIX. Representación de conceptos básicos de fotografía (Hollows, 2005).*

3.6.8. Formato “raw”

En español se conoce como “bruto de cámara”, hace referencia al formato de imagen que está grabada directamente desde el sensor, sin ningún tipo de edición.

3.6.9. Viñeteo

Fenómeno que se produce por entradas de luz en forma oblicua respecto al eje de la cámara. Genera oscurecimiento en los bordes de la imagen.

3.6.10. Eje Óptico

Línea imaginaria que sale del centro del lente, en dirección normal al plano del sensor.

Los parámetros más importantes que se pueden configurar en la cámara, con el fin de obtener la mejor imagen para distintas condiciones, son los siguientes:

3.6.11. ISO

Corresponde a la sensibilidad a la luz que tiene la cámara, es decir, la capacidad del sensor de capturar la luz reflejada en una imagen. Como se observa en la figura XX, mientras mayor sea su valor, mayor es la sensibilidad. En valores muy bajos puede producir una imagen demasiado oscura y en valores muy elevados puede producir una imagen con mucho ruido.

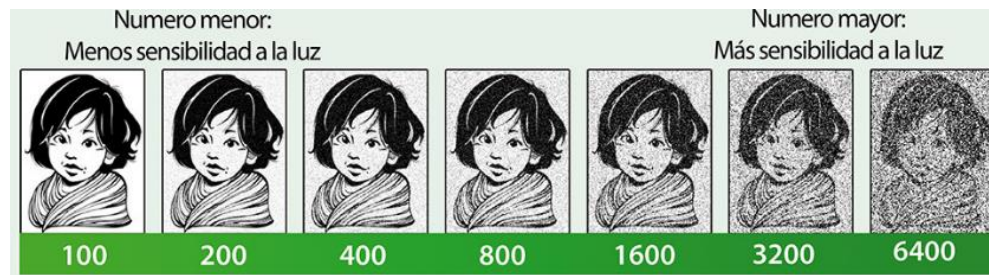


Figura XX. Diagrama Explicativo de la Sensibilidad ISO (Condés, 2019).

3.6.12. Apertura (f)

Al igual que el iris del ojo, es qué tanto se abre el diafragma de la cámara, regulando la captación de luz. Como se observa en la Figura XXI, una apertura de $f/2$ es mayor que una apertura de $f/8$, por lo tanto, deja pasar más luz.

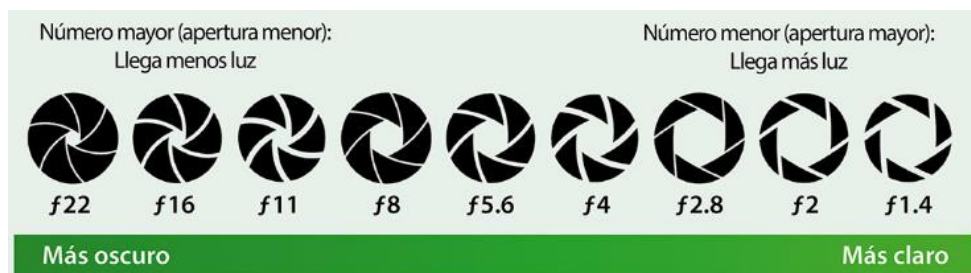


Figura XXI. Diagrama Explicativo de la Apertura del Diafragma (Condés, 2019).

3.6.13. Tiempo o velocidad de exposición

Se puede apreciar en el esquema de la Figura XXII. Como su nombre lo indica, es el tiempo que queda expuesto el sensor, recibiendo luz. Puede tener valores desde fracciones de segundo (por ejemplo, para obtener imágenes nítidas de objetos en movimiento) a varios segundos (por ejemplo, para captar más luz o poder generar imágenes con un efecto dinámico). En este último caso es imprescindible el uso de un trípode, para mantener la cámara estática y evitar fotografías con toda la imagen corrida.

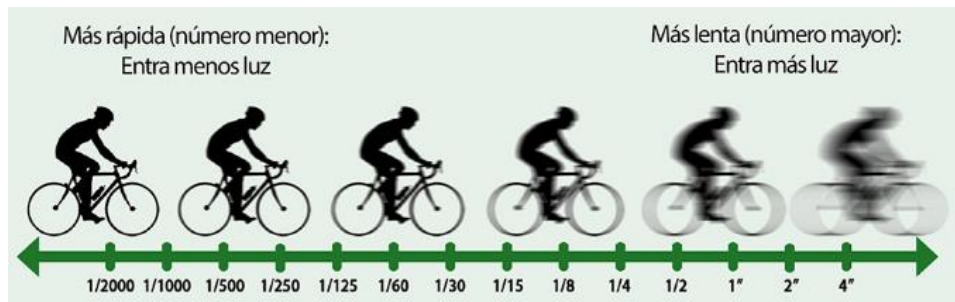


Figura XXII. Diagrama Explicativo de la Velocidad de Obturación (Condés, 2019).

3.7. Estándares Internacionales: IEC 60904-13:2018

La norma IEC 60904-13 es un estándar publicado el año 2018, parte de la norma IEC 60904, la cual aborda los dispositivos FV. Fue elaborada por el comité técnico TC 82 de la International Electrotechnical Commission (IEC). Esta parte 13 de la norma trata específicamente la electroluminiscencia en módulos FV. Parte de la normativa base de este estándar es la IEC TS 61836:2016.

Cabe señalar que existe otro estándar internacional que está relacionado con este ensayo, corresponde al IEC 60747-5-9:2019, IEC 60747 trata de los dispositivos semiconductores, la parte 5 del estándar (IEC 60747-5) trata de dispositivos optoelectrónicos. Específicamente la parte 5-9, fue publicada el año 2019, trata de dispositivos LED y de un método de testeo de la eficiencia cuántica interna basada en EL dependiente de la temperatura. Dicho método se realiza para obtener métricas del rendimiento del módulo, las cuales no son parte del alcance de este trabajo. Las instalaciones requeridas necesitan un control mucho más riguroso de las variables ambientales, ya que se deben evitar todas las perturbaciones externas. Además, se requiere poner el módulo FV en un criostato, el cual necesita un sistema de helio, compresor y bomba de vacío, con todas las variables controladas por computadora.

Retomando la norma 60904-13, los alcances de esta son:

- Métodos para capturar imágenes EL en módulos FV.
- Métodos para procesar imágenes para obtener métricas sobre ellas en términos cuantitativos.
- Proveer una guía para interpretar cualitativamente las imágenes tras observar sus características y detalles.

El documento es aplicable a módulos FV medidos con una fuente de poder que conecta las celdas del módulo en polarización directa.

La norma establece los siguientes requerimientos para el ensayo:

3.7.1. Sensor de la cámara

Debe ser sensible a las longitudes de onda que emite la radiación de EL (Tabla III), la cual depende del material de las celdas excitadas (Figura VII).

Tabla III. Materiales de Sensores y su Respectivo Rango de Longitud de Onda Sensible (International Energy Agency, 2018).

Sensor	Longitud de onda sensible μm
Ge	0,8 to 1,7
InGaAs	0,7 to 2,6
Si	0,3 to 1,1
InAs	1,0 to 3,8

3.7.2. Lente de la cámara

Debe estar libre de filtros o revestimientos de absorción que remuevan la radiación infrarroja del espectro del material semiconductor examinado. Pueden ser de distintas distancias focales, dependiendo principalmente de las condiciones geométricas al momento de la captura.

3.7.3. Filtro de la cámara

Pueden usarse filtros para ayudar a eliminar la detección de luz de longitudes de onda extrañas. Para celdas solares de silicio, se pueden usar filtros pasa-largo de entre 850 [nm] y 950 [nm].

3.7.4. Ambiente de estudio

Un ambiente en completa oscuridad favorece la captura de imágenes de alta calidad, por lo que se debe evitar la entrada de luz extraviada. Por esta misma razón se recomienda el uso de cortinas, deflectores y sellados de naturaleza absorbente de luz (color negro). De esta forma se asegura capturar sólo la luz emitida por las celdas. En caso de capturas en terreno (“outdoor”) es preferible hacerlas de noche. En mediciones de laboratorio, se requiere mantener el módulo entre 20°C y 30°C, medida con un dispositivo de resolución de 1°C. 15 segundos después de la captura,

se debe registrar esta temperatura, dato requerido en el reporte. Para un trabajo de alta precisión, debe buscarse que el módulo alcance un equilibrio térmico (esto puede ser verificado mediante un análisis de histogramas).

3.7.5. Fuente de poder

Se requiere una fuente DC que sea capaz de suministrar suficiente voltaje para que circule I_{sc} a través del módulo por ensayar. Este valor puede ser el respectivo valor de V_{oc} del panel, o, para algunos casos, un valor considerablemente mayor (Los módulos de película o delgada o thin-film). Para un reporte preciso de las mediciones de voltaje, se requiere que el cableado al módulo sea de un calibre tal que la caída del voltaje sea inferior al 2%. Para el mismo caso se requiere una configuración de 4 cables para separar la corriente de suministro de la corriente para medición de voltaje.

3.7.6. Interfaz de computadora con cámara y fuente de poder:

El control por computadora de fuente de poder y cámara permite aplicar corrientes preprogramadas y coordinar esta función con la captura de imagen. Esto es un equipamiento opcional que brindará mayor velocidad y precisión a la imagen EL del módulo.

3.7.7. Software de procesamiento y visualización de imágenes

Se debe mantener el formato “raw” de la imagen. La imagen puede estar en escala de grises (Señal más alta blanca y señal más baja en negro) o se le puede asignar una escala de colores, agregando una leyenda con el significado de cada color. El software debe tener la capacidad de producir histogramas que indiquen, en forma de distribución, las señales EL de los pixeles, ordenándolas por nivel de señal. De esta forma se pueden interpretar cuantitativamente las imágenes para las características que se observan. Algunas funciones de software pueden ser útiles para el post-procesamiento de imágenes, por ejemplo: ajuste del rango de nivel de señal, recorte de imagen a un lugar de interés, determinación del nivel de señal EL en cualquier punto, remoción de pixeles muertos, corrección de viñeteo y sustracción de cuadros (Figura XXIII). Ésta última función consiste en quitar información no deseada “restando” la información de una imagen con sólo luz extraviada (sin EL) a

una imagen EL con luz extraviada. Aunque la calidad obtenida de esta sustracción no llega a ser de la misma calidad de una imagen tomada en ambiente de oscuridad total.

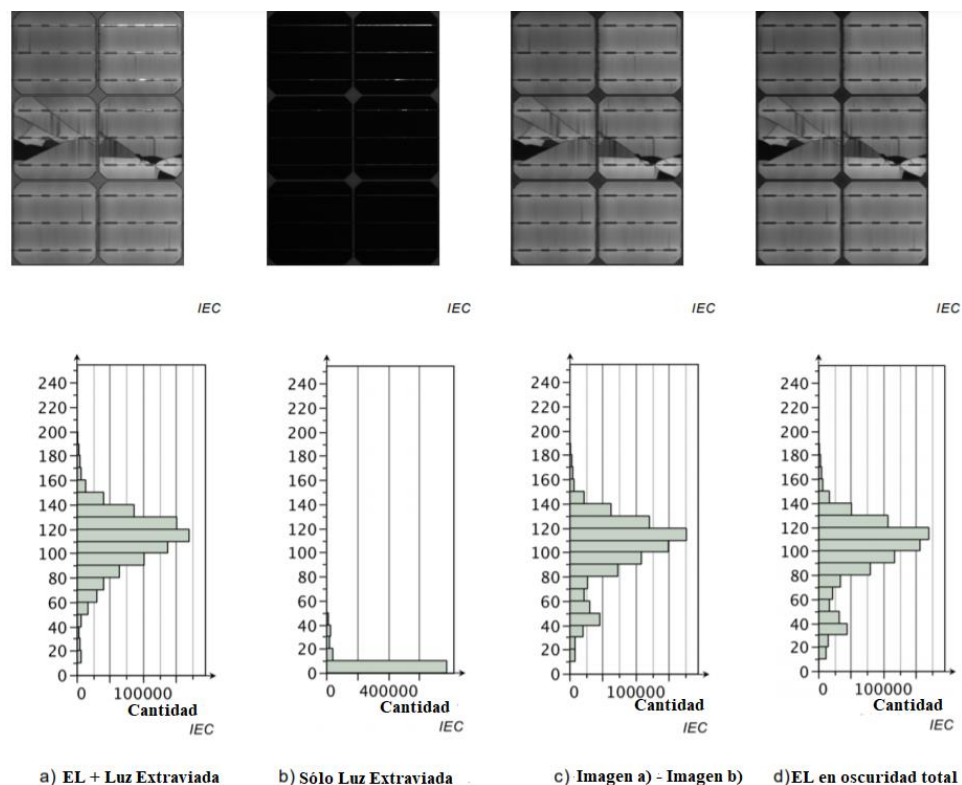


Figura XXIII. Imágenes EL y de Luz Extraviada (Módulo Sin Corriente) con sus Respectivos Histogramas y el Resultado de Sustracción de Imágenes (Imagen c) comparado con EL en condiciones ideales (Imagen d). (International Electrotechnical Commission, 2018)

3.7.8. Seguridad y manejo de dispositivos eléctricos

Realizar el ensayo EL con cables y conectores correctamente aislados, en general no implica un gran riesgo de tipo eléctrico. Sin embargo, todo protocolo de seguridad asociado debe realizarse de acuerdo con las circunstancias. Los módulos FV deben ser tratados con cuidado para que al momento de ser ensayados no se saquen conclusiones erróneas respecto a sus condiciones.

En cuanto al procedimiento del ensayo, señala lo siguiente:

3.7.9. Posición y calibración de la cámara

La cámara debe estar calibrada, realizando los procedimientos especificados por el fabricante, debe configurarse para mostrar la fecha y hora en cada captura. La posición de la cámara debe ser tal que el eje óptico y la recta normal del módulo sean, idealmente, paralelos. El ángulo máximo permitido entre ambas rectas debe ser

menor a 50°, para ángulos mayores a este, se requiere un ajuste de emisividad. Para módulos bifaciales se puede ensayar sólo la cara frontal, pero puede ser ventajoso para el análisis hacerlo por la cara posterior también.

3.7.10. Intensidad de la imagen

La intensidad de la imagen a cada nivel de polarización debe ser optimizado ajustando el tiempo de exposición, la apertura del diafragma (f) y/o la sensibilidad ISO. Esto se hace verificando con algunos de los módulos por examinar y luego se mantiene consistente para el resto de la muestra, en caso de que se requieran cambios en los parámetros para algunos módulos del grupo, estos deben ser registrados. Las imágenes optimizadas tendrán menos del 5% del área exterior al perímetro del módulo produciendo luminiscencia. La exposición debe maximizarse hasta lograr el valor máximo de la Relación Señal-Ruido (SNR), pero cuidando que los píxeles de la imagen no se saturen.

3.7.11. Ajustes de cámara recomendados

El ajuste mayor del foco puede realizarse con el módulo expuesto, el ajuste fino debe optimizarse para la señal EL que va a ser capturada, esto se evita incluyendo un filtro IR en el lente, porque el ajuste focal es igual para la luz visible y la IR. El ajuste del foco debe ser tal que se alcancen los valores de nitidez (métrica definida, por su nombre en inglés, como Sharpness) que se especifican más adelante. La sensibilidad establecida al momento de hacer la captura debe permitir una óptima resolución de la profundidad de píxeles en el módulo. No se debe cambiar el valor f entre imágenes que serán comparadas. En caso de que se permita ajustar el valor f en el archivo de imagen y que la captura sea realizada con el eje óptico atravesando el punto central del módulo, se puede seleccionar y fijar un valor f considerando que se reduzca el viñeteo y aumente la nitidez con la profundidad del campo (para capturas con una vista oblicua de la cara del módulo).

3.7.12. Comparación entre módulos

Los distintos tipos de módulos y procesos de degradación pueden comportarse de manera diferente en EL. Para hacer una comparación entre módulos con y sin degradación se puede ensayar el módulo degradado con parámetros reajustados

respecto al módulo sin degradación, esto es una medida opcional y sólo se debe hacer el ajuste variando el tiempo de exposición (la corriente tampoco debe cambiarse). Las intensidades de los pixeles pueden ser escaladas en el post-procesamiento de imágenes.

3.7.13. Montaje y captura de imágenes

En cuanto a la preparación, se debe verificar si el módulo está en la posición adecuada y si la cara que se busca ensayar es la que enfrenta a la cámara (frontal o posterior, en caso de módulos bifaciales), luego se debe configurar la cámara y generar el ambiente de oscuridad. Para recuperar la máxima cantidad de información de los módulos ensayados, se toman imágenes en 3 niveles de corriente, siempre en polarización directa:

- Corriente de corto circuito I_{sc} : como se menciona anteriormente, esta corriente se puede alcanzar aplicando el voltaje de circuito abierto VOC al módulo, pero en algunos casos serán necesarios mayores voltajes. En estos casos se debe procurar no sobrepasar los límites recomendados por el fabricante ni llegar a niveles que comprometan la seguridad del laboratorio.
- Baja corriente (10% de I_{sc}): La captura a menor corriente permite diferenciar algunos problemas en los módulos que expuestos a ISC aparentan ser muy similares. Por ejemplo, las filtraciones de humedad a ISC se pueden ver muy parecidas a los efectos de resistencias en paralelo en una captura EL, pero al comparar con la captura a baja corriente se observa que toda la celda se oscurece para el caso de la resistencia en paralelo. De la misma forma, el PID en casos severos se ve igual que los efectos de la resistencia en paralelo a baja corriente, pero al comparar con una captura a alta corriente, la de resistencia en paralelo sólo se verá como una mancha oscura en la celda.
- Corriente nula (“Background image”): Se debe realizar esta captura con el mismo tiempo de exposición que las dos anteriores, el objetivo es obtener información solamente de la luz extraviada presente en las capturas. Con dicha información se puede realizar la sustracción de imágenes y acercarse lo más posible a una imagen en condiciones de oscuridad ideal.

La omisión de una de estas tres condiciones de captura debe ser señalada como una desviación del proceso al momento de reportar los resultados. Si no se puede hacer circular corriente por el módulo, puede existir un circuito abierto dentro de éste, en estos casos se debe recurrir a técnicas de caracterización que salen del alcance de esta norma.

3.7.14. Corrección de imagen

Después de realizar la captura, las imágenes se corrigen para alcanzar una óptima calidad de imagen y así poder caracterizarla, este proceso resulta esencial si las imágenes van a ser analizadas cuantitativamente. La corrección de imágenes consiste en los procesos ya señalados de sustracción de cuadros y viñeteo.

Se definen dos métricas, que permiten cuantificar la calidad de la imagen:

3.7.15. “Sharpness”:

En español se traduce “nitidez”, es la mínima dimensión real que puede dar un contraste de 50%. Depende de la dimensión de los píxeles y el tamaño de la parte del módulo que se representa en un píxel, considera los efectos borrosos en las imágenes. Para comparar la calidad de dos módulos es necesario que ambos tengan *Sharpness* similares.

Para determinar el *Sharpness* (S) de una imagen se utiliza una medición “V-cut”, la cual considera el cálculo del ángulo y la distancia de la intersección entre dos líneas (L_1 y L_2) creadas por una máscara ubicada sobre la superficie luminiscente. Para convertir los píxeles a milímetros, lo cual es necesario para obtener el valor de r_{50} , un factor de conversión debe ser obtenido. Puede obtenerse a partir de un objeto de dimensión conocida y la cantidad de píxeles que abarca ese objeto linealmente. Se crean dos bordes en la imagen, ubicando sobre la región luminiscente con placas delgadas de metal o con cinta opaca, como se observa en la Figura XXIV.

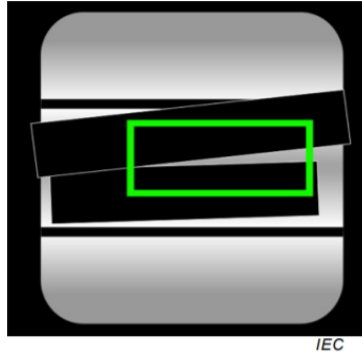


Figura XXIV. Imagen EL de una celda FV con los bordes agregados. (International Electrotechnical Comission, 2018)

El ángulo α entre L_1 y L_2 debe ser de entre 3° y 6° . Las líneas del borde atraviesan los máximos locales de una imagen de gradiente de borde G_{Edge} , como se muestra en la Figura XXV, para este cálculo se pueden usar de derivadas lineales simples.

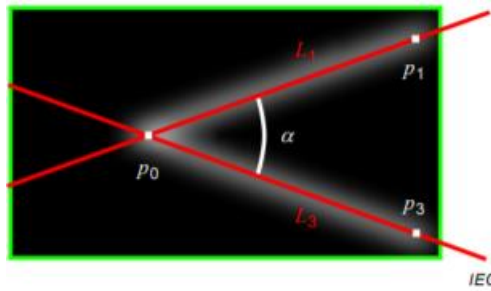


Figura XXV. Imagen de gradiente de borde, aplicando la primera derivada ortogonal $G_{x,y}$ a la región destacada de la Figura XXIV. (International Electrotechnical Comission, 2018).

La línea de en medio L_2 va desde la intersección p_0 de L_1 y L_3 hasta el punto p_2 , en el medio de p_1 y p_3 . De todos los valores de intensidad de imágenes EL trazados a lo largo de L_2 , la distancia r_{50} es medida desde p_0 hasta el punto en L_2 donde la intensidad de imagen iguala el promedio entre la meseta de intensidad de oscuridad y brillo, como se muestra en la Figura XXVI.

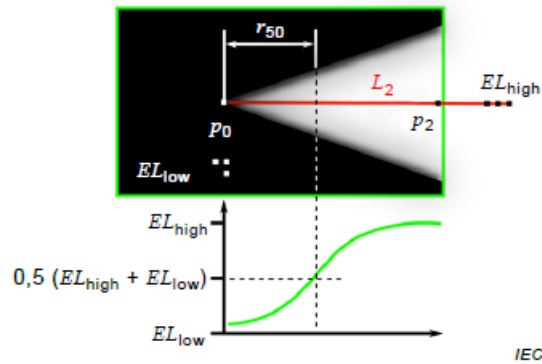
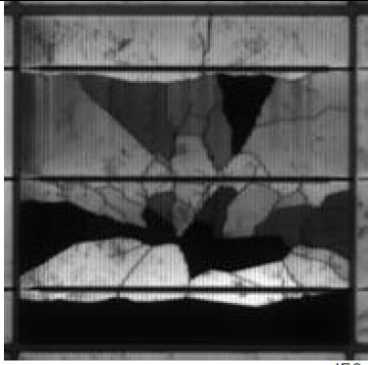
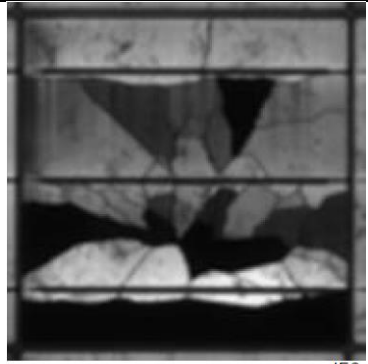
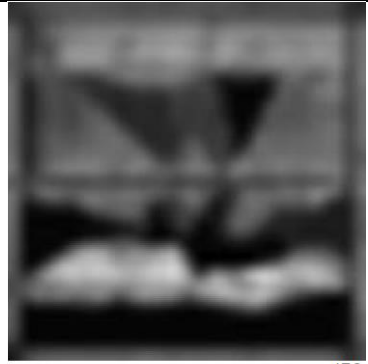


Figura XXVI. Extracto de la imagen EL de la Figura XXIV y su gráfico de valores de intensidad a lo largo de L_2 . (International Electrotechnical Commission, 2018).

Para reducir la incertidumbre, esta medición debe ser repetida por lo menos cinco veces a diferentes ángulos de rotación y a diferente ubicación del dispositivo. Finalmente, el indicador S debe ser calculado desde el promedio de todos los resultados individuales, donde el ángulo α está en radianes y la longitud r_{50} , los milímetros sobre la superficie del módulo.

Las clases entre las que se pueden comparar las imágenes EL están definidas como se describe y ejemplifica en la Tabla IV:

Tabla 4. Clases de nitidez, ejemplos y características distinguibles. (International Electrotechnical Commission, 2018)

Clase de nitidez	Ejemplo de imagen	Ejemplos de características distinguibles
$S \leq 1,5 \text{ mm}$	 IEC	- Fallas en dedos (dependiendo del ancho del dedo) - Estructura del cracking claramente distinguishible
$S \leq 5,0 \text{ mm}$	 IEC	- Efectos de dedos desconectados - Cracking tipo A y B
$S \leq 15,0 \text{ mm}$	 IEC	- Busbars - Regiones aisladas - Cracking tipo C - Áreas de menor vida útil

3.7.16. “*Signal to Noise Ratio*” SNR:

La señal EL es distorsionada por múltiples fuentes de ruido: la corriente oscura o ruido térmico es causado por la energía térmica de electrones en el sensor de la cámara. El ruido de fotón o de disparo se debe a fluctuaciones estadísticas en el número de fotones en el número de fotones emitidos desde un objeto. Existen también otras fuentes producidas por componentes electrónicos como el ruido de lectura, ruido de amplificación y ruido de cuantización. El *SNR* categoriza la razón entre la señal utilizable y la no utilizable, éste es un importante indicador de la calidad de una imagen, ya que afecta la habilidad de distinguir características EL.

Las clases de *SNR* pueden ser obtenidas de la señal EL del área activa de un módulo de referencia y aplicarse cuando se reporten las imágenes EL de otros módulos capturados, usando una cámara tal que se cumplan las siguientes condiciones:

- La intensidad del píxel promedio correspondiente al área activa de los otros módulos es igual o mayor que la del módulo de referencia
- El indicador ISO de la cámara es el mismo

El *SNR* es determinado usando el siguiente procedimiento, complementando el procedimiento de ensayo EL detallado anteriormente:

- El área oscura tras el módulo debe ser excluida, dejando que la imagen sea principalmente de la región activa de las celdas, ni la cámara ni el módulo deben moverse durante la captura de las imágenes para la aplicación de este procedimiento (si existe algún pequeño movimiento, debe realizarse una traslación manual de la imagen para que quede la captura perfectamente alineada píxel a píxel).
- Aplicar corriente en polarización directa a través del módulo hasta que la temperatura se encuentre en estado estacionario, luego, tomar dos capturas (EL_1 y EL_2) a la misma corriente. Realizar la captura en escala de grises. El tipo de datos para cálculo debe ser por lo menos del doble de resolución (en bits) de las capturas

usando *floating point*, preferentemente doble precisión de 64 bit *floating point* para prevenir errores numéricos.

- Tomar la imagen *Background* de un módulo, donde el módulo está en circuito abierto, usando la misma cámara con los mismos parámetros
- Repetir para todas las corrientes que serán estudiadas

La siguiente fórmula se usa para determinar el *SNR*, considerando un valor promedio para la captura (SNR_{50}) (International Electrotechnical Commission, 2018):

$$SNR_{50} = \frac{\sum_k \left(0,5 \cdot (EL_1(k) + EL_2(k)) - EL_{BG}(k) \right)}{\sum_k \left(|EL_1(k) - EL_2(k)| \cdot \sqrt{0,5} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \right)^{-0,5} \right)} \quad (1)$$

Todas las operaciones a las imágenes se realizan píxel a píxel en sus correspondientes configuraciones, luego se resumen para la determinación del *SNR*, la señal se define como el promedio entre ambas imágenes *EL* (EL_1 y EL_2) a las que se les aplica la sustracción de la imagen *background* EL_{BG} .

Criterios para un nivel mínimo aceptable de *SNR* depende de la aplicación de la medición. Existen 3 diferentes clases:

- Mediciones de laboratorio: $SNR_{50} \geq 45$

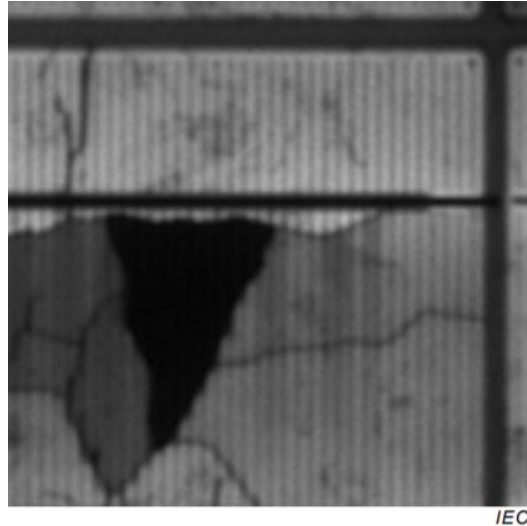


Figura XXVII. Imagen *EL* con $SNR_{50} \geq 45$. (International Electrotechnical Commission, 2018)

- Aplicaciones industriales y control del proceso: $SNR_{50} \geq 15$

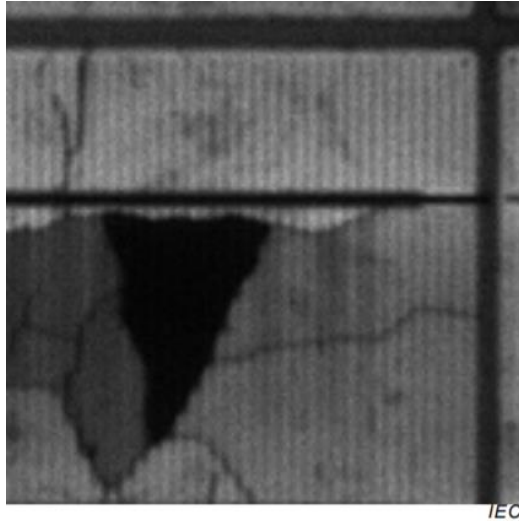


Figura XXVIII. Imagen EL con $SNR_{50} \geq 15$. (International Electrotechnical Commission, 2018)

- Mediciones en exteriores (*outdoor*): $SNR_{50} \geq 5$

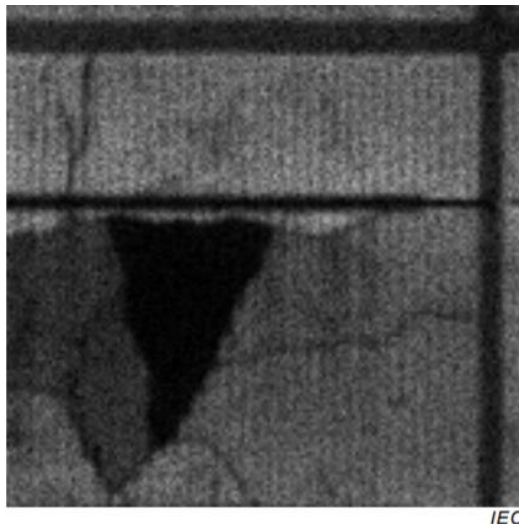


Figura XXIX. Imagen EL con $SNR_{50} \geq 5$ (International Electrotechnical Commission, 2018).

3.7.17. Interpretación y Estudio Cuantitativo de Imágenes EL

Respecto a la interpretación de imágenes se puede señalar que:

- Las áreas donde el flujo de corriente está limitado por la resistencia en serie muestran una señal EL reducida, debido a la falta de suministro de portadores en esas regiones. Por el contrario, para una corriente neta dada suministrada al dispositivo, las áreas de menor resistencia al flujo de corriente tendrán un mayor número de portadores inyectados fluyendo allí y generarán una señal EL más alta. Suponiendo que otros parámetros no estén cambiando, la tensión entre dos puntos

$(x_1$ y x_2) asociada con la resistencia de la serie en una imagen EL está relacionada con el logaritmo de las intensidades EL $K(x_1)$ y $K(x_2)$ en estos puntos, multiplicados por la constante Boltzmann k y la temperatura T (en Kelvin) según la siguiente fórmula:

$$\Delta V(x_1, x_2) = k \cdot T \cdot \left(\ln(K(x_1)) - \ln(K(x_2)) \right) \quad (2)$$

- Las resistencias en paralelo a través de la unión p-n de una celda proporcionan trayectorias de recombinación alternativas a la recombinación de borde de banda cercana responsable de la señal EL. Las altas corrientes aplicadas al dispositivo (como I_{sc}) pueden saturar las trayectorias de fuga asociadas con resistencias en paralelo, por lo que las células de un módulo pueden aparecer brillantes excepto en las ubicaciones de derivación. Cuando se reduce la corriente aplicada al dispositivo (como 10% de I_{sc}), las rutas de derivación insaturadas pueden (dependiendo de la extensión) reducir la electroluminiscencia total de la celda.
- Mientras que los defectos como el *cracking* se ven en EL con un patrón de firma fácilmente reconocible, no siempre es posible asignar un fenómeno físico específico utilizando imágenes tomadas a una única corriente y temperatura. Las señales tomadas a dos corrientes de polarización y combinadas con termografía infrarroja, fotoluminiscencia o métodos de corriente inducida por haz láser se pueden utilizar para desconvolucionar aún más causas raíz de la variación de la señal EL.

Respecto al análisis cuantitativo, además de las métricas S y SNR , existe el análisis basado en histogramas de la señal EL. Sobre ello se puede destacar que:

- Esta subclase describe métricas cuantitativas de la calidad del módulo que se pueden extraer de la distribución estadística de datos de intensidad en imágenes EL. Estos métodos, salvo cuando se indique, no informan fundamentalmente sobre los mecanismos subyacentes que pueden estar afectando a la calidad del módulo. Cualquiera o todos estos análisis se pueden aplicar opcionalmente para extraer métricas cuantitativas, que proporcionan indicadores de la consistencia o

variabilidad en la imagen EL de los módulos. Lo deseable es tener una distribución consistente y estrecha.

- La creación de histogramas y su estadística derivada a partir de las imágenes de las áreas activas del módulo y el software de análisis de imágenes serán generalmente necesarios para la aplicación de estas técnicas. Los histogramas consisten en recuentos de píxeles en cada contenedor de intensidad de EL. Estas técnicas deben aplicarse únicamente a las áreas activas de los módulos. Las áreas irrelevantes de fondo se minimizarán durante la toma de imágenes o cualquier análisis digital de la distribución de EL.
- Un módulo de referencia libre de defectos conocidos es útil para la comparación con módulos degradados del mismo tipo. Cualquier módulo degradado hará referencia y replicará esta misma condición de procesamiento de captura de imagen que el módulo de referencia.
- Los métodos de este tipo buscan cuantificar grietas en celdas FV que se pueden utilizar como una herramienta de diagnóstico para calificar el daño celular, específicamente mediante cracking (de tipo A, B y C). Aplicable especialmente a módulos después de la fabricación, transporte, instalación y exposición en terreno. Las grietas de las celdas solares pueden ocurrir durante la fabricación, el estrés mecánico sostenido durante el transporte del módulo, la instalación del módulo fotovoltaico (PV), las cargas de viento/nieve, y la fatiga térmica.
- Los anchos de los histogramas de las distribuciones de entre un 10% y un 50% de la intensidad máxima se pueden comparar. Puede darse el caso que existan distribuciones bimodales u otras distribuciones con múltiples picos. Pueden exigirse umbrales para la separación de las distribuciones para la aplicación de análisis.
- En este análisis se calcula la señal EL promedio de todos los píxeles de la imagen del módulo. La varianza se calcula como el promedio de las diferencias cuadradas con respecto a la media. Una mayor varianza significa una mayor variación de EL en todos los módulos.
- Curtosis es un indicador de la existencia de colas en la distribución, una alta Curtosis indica que hay extremos en las señales EL del módulo.

- Es posible calcular la diferencia de los histogramas relativos entre el módulo sometido a prueba y el dispositivo ideal (referencia) del mismo tipo. Para ello, ambos histogramas deben dividirse por el área del dispositivo correspondiente en píxeles cuadrados. El signo y la magnitud de los elementos de la matriz resultante trazados como una función de intensidad EL es la métrica más relevante.

Se señala también la información mínima que se debe registrar tras realizar el ensayo, proponiendo la siguiente estructura de reporte:

- a) Título.
- b) Nombre y dirección del laboratorio de pruebas y lugar donde se llevaron a cabo las pruebas.
- c) Identificación única del informe y de cada página.
- d) Nombre y dirección del cliente (si aplica).
- e) Descripción, caracterización, condición e identificación del elemento testeado.
- f) Fecha de recepción de artículos y fechas de la prueba (si aplica).
- g) Identificación de los equipos de medición utilizados, incluyendo cámara, detector y lente.
- h) Información, ya sea haciendo referencia a las cláusulas apropiadas de este documento, o información adicional según sea necesario. Describiendo las correcciones de imagen aplicadas, incluyendo, pero no limitado al manejo de eventos de una sola vez, píxeles atascados y eliminación de fondo, mejora con filtros u otras manipulaciones del archivo de imagen sin procesar.
- i) Referencia al procedimiento de muestreo, cuando proceda.
- j) Clase de nitidez y nitidez determinada (S), clase SNR_{50} y la categoría de aplicación correspondiente para las condiciones de imagen y si se evalúa específicamente para el módulo en imágenes o el módulo de referencia.
- k) Tiempo de exposición, WD, ganancia (o ajuste de parámetro ISO), número de apertura f .

- l) Cualquier desviación, adición o exclusión del método de prueba, y cualquier otra información relevante para la prueba específica, como las condiciones ambientales.
- m) Imágenes (pre y post procesadas, según corresponda) obtenidas durante los exámenes y resultados derivados soportados por tablas, gráficos, datos de histograma, bocetos según corresponda que muestren la orientación del módulo cuando se montan en matrices (la Figura 9 muestra un esquema para hacer referencia a celdas en módulos móviles).
- n) Corriente y voltaje (si se mide) aplicados en el módulo sometido a prueba, temperatura del módulo, ajustes de la cámara, distancia de trabajo, ángulo de imagen (grados de lo normal) y condiciones nominales de luz ambiental.
- o) Cualquier fallo, con posición en módulo y tipo de defecto.
- p) Una declaración de la incertidumbre estimada de los resultados de las pruebas, incluida la información de SNR (cuando aplique).
- q) Una firma y un título, o una identificación equivalente de la(s) persona(s) que acepta la responsabilidad por el contenido y la fecha del informe.
- r) Cuando proceda, una declaración en el sentido de que los resultados se refieren únicamente a los elementos analizados.
- s) En su caso, una declaración de que el informe no se reproducirá en su totalidad, sin la aprobación por escrito del laboratorio.

3.7. Electroluminiscencia para Sistemas Fotovoltaicos en Chile

Actualmente en Chile existen al menos 4 entidades que realizan el Ensayo de Electroluminiscencia, ya sea para fines de investigación o comerciales. Como se menciona anteriormente, en el ámbito industrial (comercial) las aplicaciones son principalmente servicios a clientes de generación o instalaciones de menor escala, siempre relacionados a mantenimiento, control de calidad y certificaciones.

Dentro de estas entidades están:

- Universidad de Antofagasta, dentro del programa de su Centro de Desarrollo Energético (CDEA) está la “Investigación + Desarrollo e Innovación” en energías renovables no convencionales, dentro de este marco, se realizan ensayos de electroluminiscencia con fines de investigación (Universidad de Antofagasta, 2015).
- TÜV Rheinland Chile es una sociedad filial de TÜV Rheinland Group, organismo de certificación internacional líder en servicios técnicos independientes para la calidad, seguridad y el medio ambiente. Para llevar a cabo sus servicios de certificación, destacan la realización del ensayo de electroluminiscencia (TÜV Rheinland, 2021).
- SGS es una empresa multinacional Suiza dedicada al testeo, implementación y certificación de sistemas y procesos industriales. Dentro de sus áreas de experiencia se encuentra la industria fotovoltaica, en donde ofrecen servicios de pruebas y ensayos de precalificación que incluye pruebas de electroluminiscencia (SGS Chile, 2021).
- Fraunhofer Chile es filial de Fraunhofer-Gesellschaft, organización multinacional con sede en Alemania de investigación aplicada. En Chile realizan servicios a las grandes generadoras de energía fotovoltaica del país, utilizando su método propio que incluye ensayos EL outdoor, trazado de curva IV y mediciones de degradación de baja incertidumbre en terreno (Fraunhofer Chile, 2021).

3.8. Análisis de Imágenes por Aprendizaje de Máquinas

Desde una perspectiva computacional, el píxel es la unidad fundamental (más pequeña, indivisible) que compone una imagen, cada imagen puede ser representada como una matriz de dimensiones “MxN” donde “M” es el número de píxeles de ancho y “N” el número de píxeles de largo. Dependiendo de la intensidad del color representado o, para el caso de la EL en escala de grises, la luminosidad percibida, cada píxel toma un valor distinto. Generalmente, las imágenes son procesadas en formato de 8 bits, lo que quiere decir que un píxel puede tomar un valor entre 0 y 256, y dependiendo del espacio de color analizado, pueden existir hasta 3 matrices de píxeles que compongan una imagen. Para el caso particular de imágenes en escala de grises, es solo una matriz.

Procesando las imágenes como objetos matriciales, es posible aplicar operaciones matemáticas para encontrar patrones que ayuden a describir la imagen. Técnicas clásicas de análisis de imágenes usan estadística para procesar la información. Recientemente, el uso de redes neuronales convolucionales (en inglés “Convolutional Neural Network”, CNN) ha permitido un análisis más profundo de imágenes, logrando grandes avances en el campo de visión computacional (Cavieres, 2021).

Una red neuronal es un procesador distribuido en paralelo de forma masiva con una propensión natural a almacenar conocimiento experimental y convertirlo en disponible para su uso. A semeja al cerebro en dos aspectos: El conocimiento se adquiere por la red mediante un proceso de aprendizaje y las fuerzas de conexión interneuronal, conocidas como ponderaciones sinápticas, que se utilizan para almacenar el conocimiento (IBM Corporation, 2020). Por su parte, las redes neuronales son Las CNN son un tipo de Red Neuronal Artificial que utiliza Convoluciones para el procesamiento de imágenes. Las convoluciones consisten en operaciones que recorren la o las matrices en grupos de pixeles cercanos, generando matrices más pequeñas y operando con ellas y la matriz original para obtener un mapa de detección de características (Na8, 2018).

4. Laboratorio Indoor de EL para Módulos FV

4.1. Directrices Generales

El ensayo de electroluminiscencia sin mayor estandarización puede servir para arrojar un diagnóstico de un módulo (o una muestra de módulos) en algunos casos. Por ejemplo, se puede realizar una captura de una visión panorámica de una configuración de módulos FV, en un espacio abierto y de noche, siempre y cuando se configuren correctamente los parámetros de la cámara, Figura XXX, (International Energy Agency, 2018). Así como se puede realizar una captura EL en un espacio no controlado y con poca luz. En estos casos no se podrán obtener imágenes con indicadores de calidad comparables a los obtenidos en laboratorio. Volviendo al ejemplo de la Figura XXX, en estos tipos de capturas, sólo los módulos de la parte más cercana a la cámara (los de más abajo) pueden ser capturados con imagen nítida, el detalle se observa en la Figura XXXI.

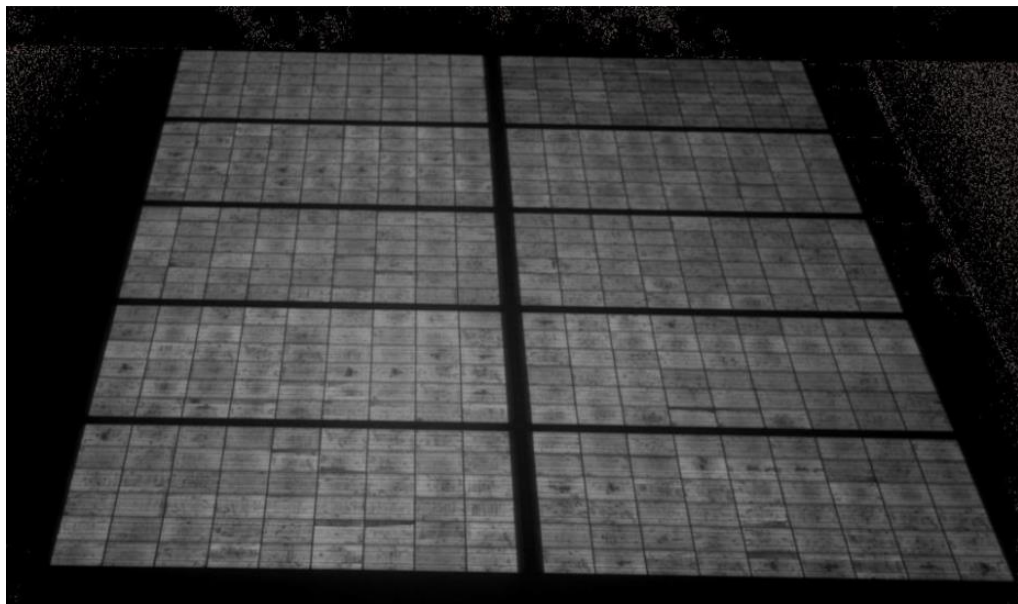


Figura XXX. Captura EL realizada outdoor a un grupo de módulos montados sobre el techo de una instalación (International Energy Agency, 2018).

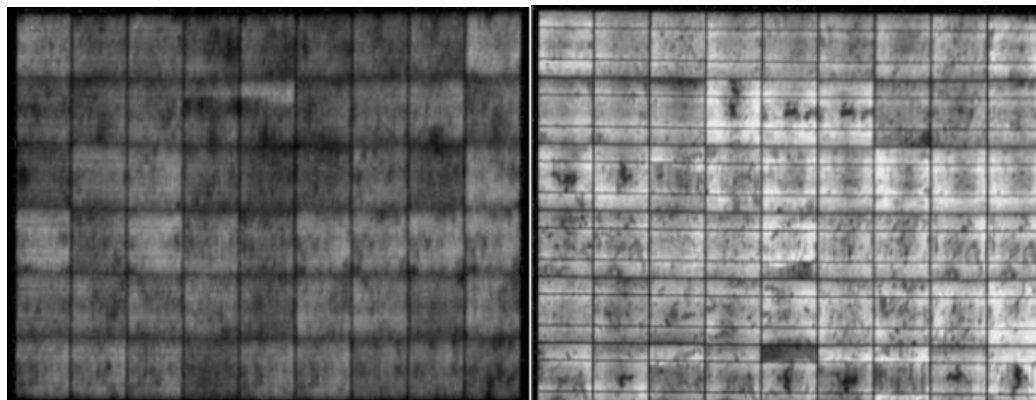


Figura XXXI. Detalle de la captura EL en Figura XXX, a la izquierda un módulo de la fila superior del grupo, a la derecha un módulo de la fila inferior (International Energy Agency, 2018).

Dentro de los métodos de estudio basados en electroluminiscencia, puede señalarse que el ensayo *indoor* en oscuridad es el que tiene mayor potencial de desarrollo, ya que las imágenes capturadas siguiendo las directrices de la Norma IEC 60904-13:2018 pueden alcanzar niveles de calidad muy superiores. Sólo en estas condiciones es posible determinar con seguridad, por ejemplo, casos de *cracking* tipo C, infiltraciones de humedad en celdas, celdas aisladas o errores de manufactura, características que pueden ser muy difíciles de distinguir. Los valores más altos de las métricas señaladas en la sección 3, el *Signal to Noise Ratio* SNR_{50} y el *Sharpness* S , sólo pueden ser alcanzados de esta forma.

Como se señala en la Sección 3, existen varios requerimientos asociados al espacio en el que se debe realizarse el ensayo de electroluminiscencia *indoor*. Por esta razón, se realizan ensayos preliminares, que serán descritos en detalle en la sección 5. Estos ensayos son necesarios para definir los parámetros generales del laboratorio, considerando los siguientes puntos:

- El laboratorio terminado debe contar con el espacio suficiente para tener dentro de sus dependencias todos los implementos necesarios del ensayo, pero no necesariamente una muestra de módulos por ensayar o los implementos para el procesamiento de imágenes.
- La implementación y ambiente deben permitir realizar capturas que al menos puedan ser analizadas cualitativamente y permitan la identificación de distintos tipos de fallas en el módulo, más allá de las que podrían ser detectadas en un

ensayo sin mayor estandarización. El laboratorio diseñado debe poder cumplir con todos los requerimientos mínimos de la Norma IEC 60904-13:2018, no así con los parámetros requeridos para el análisis cuantitativo de capturas EL ni con otros estándares con mayores niveles de control de variables ambientales como la IEC 60747-5-9:2019.

La realización de estas sesiones preliminares permite determinar la factibilidad de cumplir los requerimientos de la norma y acotar el nivel de calidad que se busca en las imágenes, así como la compilación de todas las consideraciones que se deben tomar para desarrollar tanto el diseño del laboratorio como la metodología del ensayo.

4.2. Espacio Destinado para la Implementación

La USM (Universidad Técnica Federico Santa María) tiene dentro de sus dependencias en Campus San Joaquín el Laboratorio de Alta Tensión, perteneciente al Departamento de Ingeniería Eléctrica. Dentro de este laboratorio, está instalada una Jaula de Faraday (Espacio interior a un cuerpo conductor en equilibrio eléctrico, por sus propiedades anula el efecto de cualquier campo externo). En la Figura XXXII se puede apreciar esta estructura y el sector del laboratorio en el que esta se encuentra.

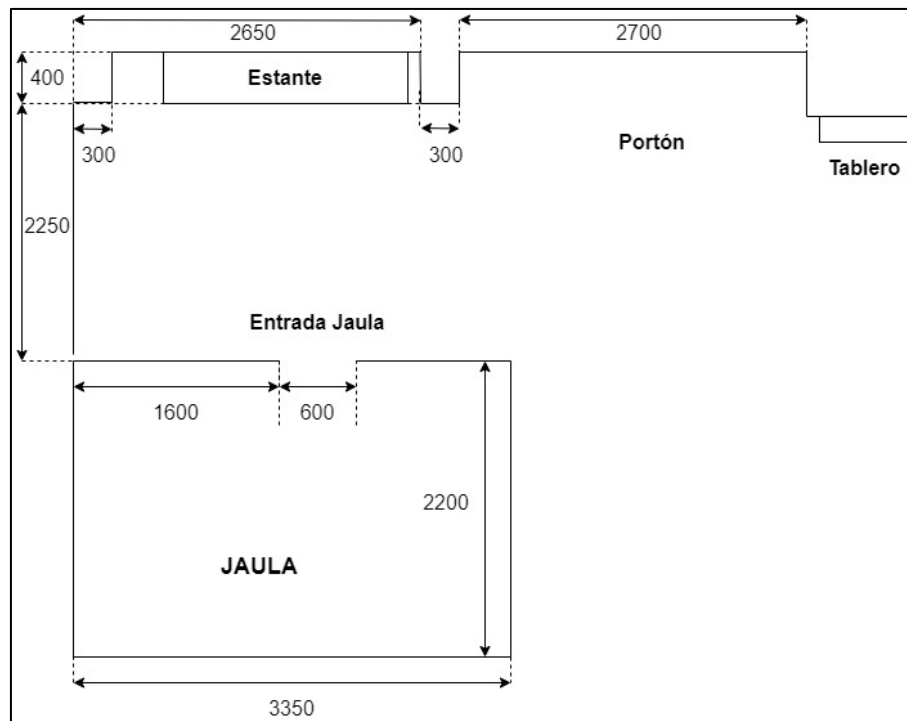


Figura XXXII. Layout actual del espacio en el Laboratorio AT, se observa la Jaula de Faraday. Dimensiones de longitud en milímetros [mm].

La Jaula consiste en una estructura metálica ligera, compuesta por perfil de aluminio estructural (o “perfil CNC”) y planchas de aluminio de espesor de 1 [mm], al cerrarse, es posible mantener el espacio con muy poca luminosidad. Como se observa en la Figura XXXIII, las dimensiones de la jaula son 2,2 [m] de largo, 3,35 [m] de ancho y 3,05 [m] de alto. Se puede notar también que existe un tablero relativamente cercano que permite suministrar energía a los equipos eléctricos que se necesiten para cualquier procedimiento. Dicho tablero cuenta con tomacorrientes pequeños de 220V y con tomacorrientes industriales de 220V y 380V. El espacio frente a la Jaula es de aproximadamente 2,5 [m] de largo y 3 [m] de ancho, lo cual es suficiente para dejar elementos y equipos de considerable tamaño para cualquier procedimiento. Ya que este espacio corresponde al Departamento de Ingeniería Eléctrica, es posible acceder fácilmente a implementos eléctricos para las pruebas que se requieran realizar en el lugar.

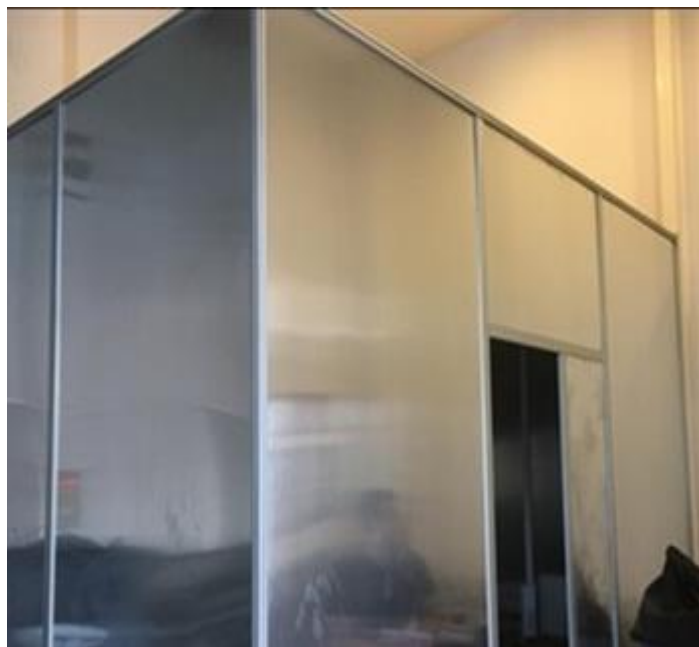


Figura XXXIII. Vista frontal exterior de la Jaula de Faraday en el Laboratorio AT.

Cabe agregar que, dentro de esta misma estructura, se implementará un laboratorio de degradación UV, el cual ya ha sido diseñado en otro trabajo, todos los espacios, criterios y consideraciones que se mencionarán en los siguientes apartados de la Sección 4 están alineados con dicho trabajo.

4.3. Requerimientos Estructurales del Laboratorio

En primer lugar, se debe mencionar que el Departamento de Ingeniería Mecánica y el Departamento de Ingeniería Eléctrica de USM Campus San Joaquín han acordado que el espacio (Jaula de Faraday y su espacio aledaño) puede ser utilizado por ambas carreras.

Según lo mencionado en la Sección 3, apartado 3.6 (referente a la Norma IEC 60904-13:2018), lo definido en el párrafo anterior y lo que se pudo observar tras las pruebas preliminares, los requerimientos estructurales del laboratorio son los siguientes:

4.3.1. Requerimientos de Espacio

- La Jaula de Faraday puede modificar sus dimensiones y composición de muro, techo y puertas. Sin embargo, el resultado de las modificaciones debe permitir que se mantengan las propiedades de la Jaula como tal, además, el

espacio extra requerido en el laboratorio de AT no puede dificultar o imposibilitar ningún otro procedimiento que se realice allí.

- El espacio total dentro de la jaula de Faraday debe ser distribuido para dos fines, el primero es el Laboratorio Indoor de EL y el segundo es el laboratorio de degradación UV, cuyos requerimientos específicos de espacio se detallan más adelante.
- El espacio en el laboratorio debe ser suficiente para que no sea mandatorio el retiro de la estructura de soporte de los módulos FV, cuando el Laboratorio EL Indoor no esté siendo utilizado como tal. Dicha estructura debe estar diseñada para ensayar un módulo a la vez, considerando una dimensión de referencia máxima de 2000x1000 mm. Se entiende a raíz de esto, que las dimensiones de la puerta deben permitir el tránsito de esta estructura y los módulos FV.
- La instalación de la unidad de enfriamiento debe ser desmontable, pero se debe contemplar el espacio que ésta ocupa en el laboratorio para que no sea mandatorio su desmontaje cuando el espacio no es ocupado como un laboratorio de EL.
- Se requiere la presencia permanente del estante para instrumentación, que debe permitir almacenar todos los implementos necesarios para el ensayo, incluido el cableado y conexiones.
- Además del espacio para los implementos antes mencionados, se debe considerar el espacio para ubicar el cableado, el espacio que ocupa la base del trípode de la cámara, la distancia mínima módulo – cámara y el espacio libre para transitar de quien realiza el ensayo.
- Como el ensayo está pensado para realizarse en muestras de múltiples módulos, debe quedar espacio suficiente para transitar con el módulo más grande permitido, sin necesidad de tener el trípode montado en su posición demarcada.
- La apertura de la puerta debe ser hacia afuera, y su ubicación debe permitir el fácil montaje y uso de la cortina blackout.
- Se debe considerar que todo el cableado debe salir del laboratorio a través de un pasacables de material metálico que mantenga las propiedades de Jaula de

Faraday, esto implica que el pasacables tenga una forma que ocupe más espacio que un pasacables comercial.

- Es importante que el laboratorio cuente con un piso firme, que permita estabilidad en la base del trípode, por lo que al piso del laboratorio se le debe sobreponer palmetas de caucho, que cubren este requisito y además cuenta con las propiedades aislantes necesarias.

4.3.2. Requerimientos para Condición de Oscuridad

Respecto a la condición de oscuridad total requerida para el ensayo, se debe tener en cuenta:

- Aunque la puerta del laboratorio está cerrada, se debe asumir que siempre existirá luz extraviada que ingrese y perjudique el resultado de los ensayos, por lo que debe implementarse una cortina blackout frente a la puerta, de dimensiones ligeramente superiores a las de la puerta.
- Considerando el estado inicial de la Jaula, se deben sellar apropiadamente las terminaciones de las murallas, para que no se permita la entrada de luz extraviada al interior.
- El color de la estructura para módulos FV, unidad de enfriamiento, estante para instrumentación y la cara interna de los muros del laboratorio debe ser negro o un color oscuro, para evitar el reflejo de cualquier luz extraviada (en caso de que su entrada resulte demasiado difícil de evitar).
- El pasacables debe estar cubierto por el lado interior del laboratorio y correctamente sellado para evitar entradas de luz a través de él.
- Cualquier perforación en la muralla (por ejemplo, para la instalación de la cortina blackout) debe quedar correctamente sellada.

4.3.2. Requerimientos para Control de Variables Ambientales

La temperatura del módulo durante el ensayo debe ser de 25 ± 5 [°C], para cumplir con dicho requerimiento se debe considerar:

- Como se menciona en el apartado 4.3.1, dentro de la Jaula de Faraday el espacio debe ser compartido con el Laboratorio de Degradación UV, el cual

lleva a cabo ensayos de larga duración a una temperatura constante de 60 ± 5 [°C]. Por lo tanto, debe considerarse usar aislamiento térmico (además de el de las paredes exteriores) ya que dicha temperatura de ensayo se sale de lo que dicta la Norma IEC 60904-13.

- Gracias al entorno en el Laboratorio AT, la variable de temperatura ambiental no necesita ser regulada mayormente, al menos en la cota menor, ya que el módulo ensayado emana calor suficiente para alcanzar la temperatura ambiental requerida.
- El Laboratorio AT no alcanza temperaturas perjudicialmente altas en ninguna estación del año, además, si el ensayo se realiza correctamente, la temperatura del módulo y del interior del laboratorio no aumentarán considerablemente. Sin embargo, si se realizan muchos ensayos y/o no se realizan correctamente, la temperatura puede ser un agente perjudicial en el ensayo. Es por lo anterior que se debe incluir una unidad de enfriamiento.

El ensayo debe realizarse a presión atmosférica y dentro del rango de humedad relativa entre 45% y 85%.

- Los valores de humedad no representan un requisito difícil de cumplir, solamente se debe tener presente que la limpieza del módulo no debe hacerse con atomizador de agua (y si se hace, debe hacerse fuera del Laboratorio El Indoor) ni es aceptable la entrada de agua al laboratorio. De todas formas, se requiere un equipo, análogo o digital, para documentar estas y todas las variables ambientales relevantes.
- La presión ambiental no representa un factor relevante, pero es una variable que debe ser documentada, por lo que también se requiere de un equipo análogo o digital de medición.

Otras condiciones que deben cumplirse son:

- No deben existir sonidos muy fuertes y fuentes de vibración cercanas, dentro del Laboratorio AT o en sus cercanías, ya que afecta la calidad de la fotografía. Esto sólo aplica para el lapso en que se realiza la captura, pero tampoco es

recomendable llevar a cabo el procedimiento entre ruidos excesivos, ya que dificulta la operación y la comunicación entre quienes realizan el ensayo.

- Por reglas de seguridad del laboratorio, el ensayo debe realizarse al menos por dos personas, la cantidad excesiva de personas en el sector tampoco es recomendada.

4.4. Implementos para el Laboratorio

Usando como base la Norma IEC 60904-13:2018, agregando sugerencias realizadas directamente por miembros del TC (Comité Técnico) correspondiente (en la IEC) y considerando también lo estudiado en las pruebas preliminares, Se pueden mencionar todos los implementos necesarios para realizar el ensayo de EL indoor para módulos FV. Pero primero se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- A continuación, se detallan diferentes equipos e implementos con modelos específicos. Esto representa sólo una referencia, ya que la mayoría son implementos disponibles en el Laboratorio AT, existen otros modelos aplicables, e incluso otro tipo de equipos. Se debe considerar que se cumplan las directrices de la Norma IEC 60904-13 y las consideraciones señaladas en este trabajo.
- Los implementos en la siguiente lista pueden estar sujetos a modificaciones, en caso de que se quieran tomar imágenes con nuevos estándares o con distintos objetivos a los mencionados en este trabajo.

Dicho esto, los implementos requeridos son los siguientes:

4.4.1. Fuente de Poder

- Requisitos mínimos:
 - Fuente de poder DC portátil.
 - Longitudes menores a 320 [mm] de ancho, 500 [mm] de largo y 700 [mm] de alto (no debe superar esta medida en ninguna de las 3 dimensiones).
 - Al estar sobre el estante o bajo éste, debe ser posible operar sin dificultades de espacio su tablero o perillas de control.
 - En caso de que sea un equipo pesado, de preferencia que cuente con algún mecanismo auxiliar que haga más fácil su traslado.

- Descripción equipo de referencia: Variac Trifásico transportable, corriente alterna 400 [V] 20 [A], corriente continua 600 [V] 20 [A].



Figura XXXIV. Variac Trifásico.

4.4.2. Cámara EL y Disparador

- Requisitos mínimos:
 - Cámara profesional de alta definición, habilitada para realizar capturas en escala de grises y en formato RAW.
 - Sensor de material sensible a las frecuencias IR (Tabla III) que están dentro de la respuesta espectral del material del módulo (Generalmente silicio, Figura VII).
 - Preferentemente con lente gran angular, dado que se debe poder capturar la imagen de módulos grandes, sin gran disponibilidad de espacio.
 - El lente debe contar con un filtro pasa-largo de entre 850 [nm] y 950 [nm].
 - Debe contar con un disparador remoto compatible, que funcione a una distancia mínima de 1,5 [m].
- Equipo de referencia: Cámara profesional marca Nikon modelo D750 modificada (se eliminó del sensor el filtro IR, trabajo realizado por un técnico certificado de la marca). Lente marca Tokina ATX-PRO 17-35 mm f/4 con un

filtro que restringe elimina del paso de radiación con longitudes de onda inferiores a 850 [nm]. El disparador remoto corresponde a un modelo genérico compatible con la cámara.



Figura XXXV. Ejemplo de Cámara fotográfica profesional + lente. A la derecha una foto del disparador remoto (vía cable) compatible.

4.4.3. Trípode de Cámara EL

- Requisitos mínimos:
 - Ser compatible con la cámara por utilizar.
 - Tener la capacidad de tener la cámara a una altura de 1 [m] mínimo.
 - Al estar montado, su base debe ocupar una superficie inferior a la de un círculo de 80 [cm] de diámetro.
 - Con la capacidad de rotar la cámara en 3 ejes.
 - Preferentemente ligero, fácil de montar.



Figura XXXVI. Ejemplo de trípode de cámara profesional.

4.4.4. Estructura de Soporte de Módulos FV

- Requisitos mínimos:
 - Tener las dimensiones suficientes para montar módulos de gran tamaño, los módulos más grandes de la industria pueden alcanzar dimensiones de 2500 [mm] de largo y 1300 [mm] de ancho (Eternalsunspire, 2020)(Anexo 10.1).
 - Que sus dimensiones permitan ser sacado por la puerta del laboratorio sin necesidad de ser desarmado.
 - Contar con un sistema de ganchos que permitan montar y sacar los módulos de la estructura, en todas sus versiones y dimensiones. Los paneles más pequeños son de dimensiones de alrededor de 250x300 [mm].
 - Estar balanceada, para que los módulos se encuentren en un plano siempre perpendicular al eje de la cámara.
 - Que su estructura resista sin problemas los paneles más pesados en el mercado, cuya masa es alrededor de 25 [kg].
 - En el plano del piso del laboratorio, debe permitir la distancia adecuada entre módulo y cámara (1,5 [m]).

- Equipo de referencia: Estructura en base a perfil de aluminio estructural (también conocido como perfil CNC) de 40x40 [mm] 40x80 [mm] y 80x80 [mm]. Su diseño se detallada en las Figuras XXXVII, XXXVIII y XXXIX.

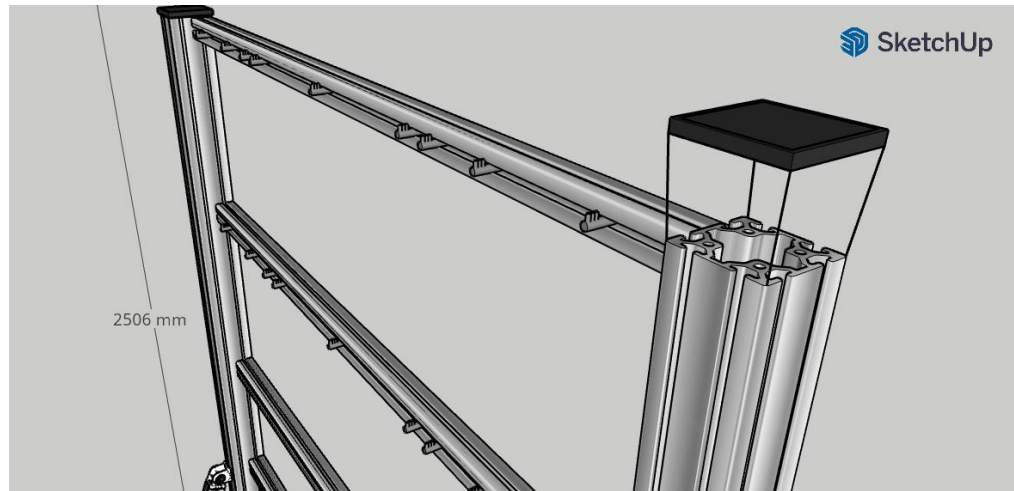


Figura XXXVII. Detalle la parte superior de la estructura de soporte de módulos, ganchos de soporte y perfil de una de las columnas principales.

En la Figura XXXVII se observa la parte superior de la estructura y los ganchos en los que se soportan los módulos FV. Además, se observa una columna principal (perfil aluminio estructural 80x80 [mm]) con su respectiva tapa en la terminación. Los perfiles cruzados también son de aluminio estructural, pero de 40x40 [mm].

En la vista de la Figura XXXVIII se puede apreciar la estructura desde la perspectiva de quien realiza el ensayo, los perfiles en dirección paralela a la línea de visión son de aluminio estructural, de 80x40 [mm], el resto de los perfiles son de 40x40 [mm] (excepto los de las columnas principales, mencionados en el párrafo anterior). También se aprecian en esta vista las dimensiones generales de la estructura.

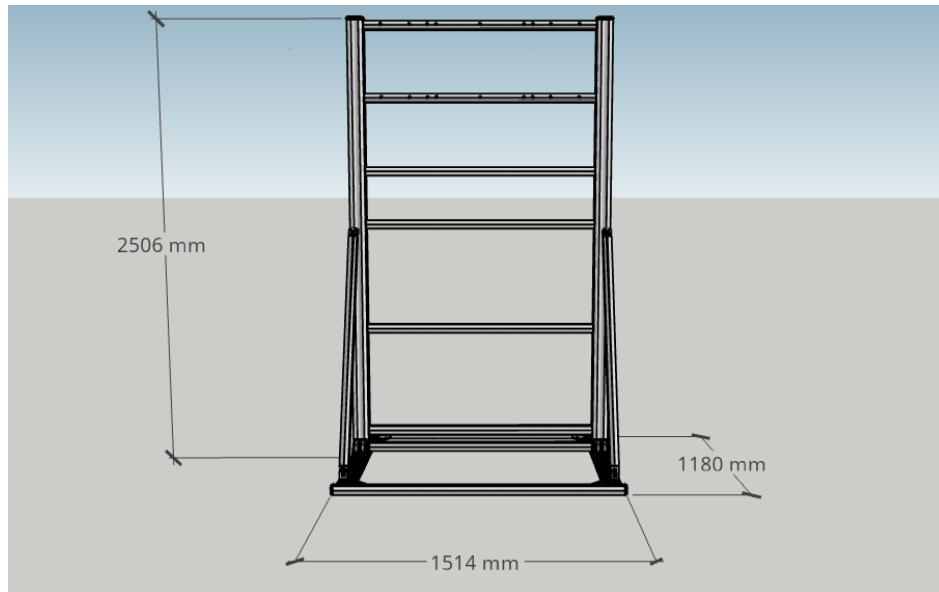


Figura XXXVIII. Se observa la estructura de soporte de módulos desde la perspectiva de quien realiza el ensayo.

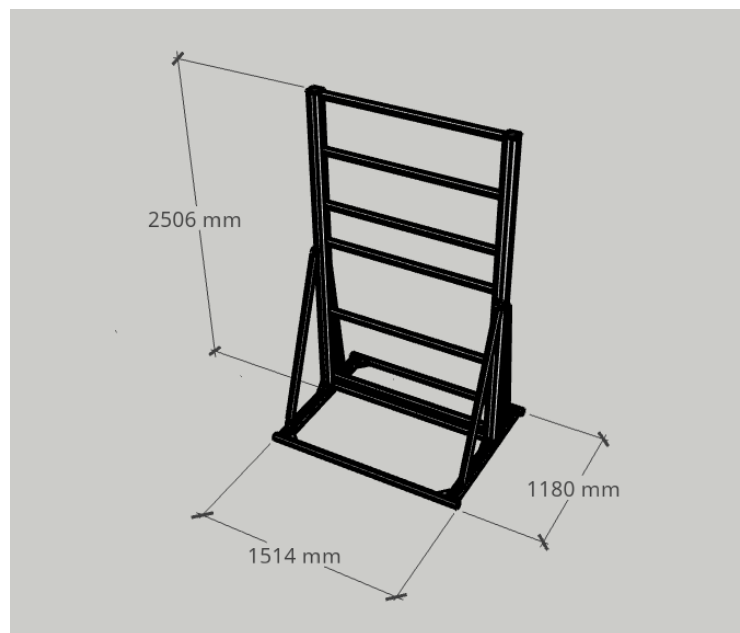


Figura XXXIX. Vista isométrica de la estructura

4.4.5. Sensor de Temperatura o Termostato

- Requisitos mínimos:
 - Que sea un equipo diseñado para medir temperatura en superficies, por contacto. Si es un termostato, que sea monofásico.
 - Preferentemente que permita medir en 2 o 3 puntos, para verificar homogeneidad en la temperatura del módulo.

- Que cuente con pantalla digital.
- Rango de medición de, al menos 0 – 100 [°C] e incertidumbre máxima de 0,5 [°C].

4.4.6. Amperímetro

- Requisitos mínimos:
 - Que cuente con pantalla digital.
 - Rango de medición de, al menos 0 – 10 [A] e incertidumbre máxima de 0,01 [A].
 - Preferentemente que sea de tipo tenaza. En caso contrario, debe ser compatible con el resto de las conexiones de montaje.

4.4.7. Voltímetro

- Requisitos mínimos:
 - Que cuente con pantalla digital.
 - Puede ser un multímetro.
 - Conexiones compatibles con las del resto del montaje.
 - Rango de medición de, al menos 0 - 100 [V] e incertidumbre máxima de 0,01 [V].

4.4.8. Cortinas Blackout

- Requisitos mínimos:
 - Color oscuro, que no deje pasar ni la más mínima entrada de luz.
 - Que sea de dimensiones superiores a las de la puerta del Laboratorio EL (2 [m] de alto y 0,8 [m] de ancho).
 - Que su soporte superior de dimensiones compatibles con el espacio aldaño a la puerta del Laboratorio.

4.4.9. Unidades de Enfriamiento

- Requisitos mínimos:
 - Ventilador de pared, con anclaje a muralla (desmontable) o de pedestal.
 - Potencia suficiente para enfriar de manera rápida el módulo.

- Con la capacidad de ajustar la dirección del flujo al menos en el eje vertical en caso de que haya problemas de uniformidad en la temperatura.
- Espacio compatible con la parte entre la estructura de soporte de módulos y la pared tras ésta.
- De preferencia con velocidad ajustable y adaptable a encendido por termostato.

4.4.10. Estante para Instrumentación

- Requisitos mínimos:
 - Que sea de dimensiones compatibles con el espacio que deja el soporte de módulos FV, que es de aproximadamente 35 [cm].
 - Que permita un espacio entre sus patas para ubicar una fuente de poder de mayores dimensiones (como el Variac Trifásico señalado en la Sección 4.4.1).
 - De preferencia ligera y de geometría favorable para traslado.

Con todos estos implementos, más los requerimientos mencionados en el apartado 4.3 de la presente sección, es posible elaborar el diseño final del Laboratorio Indoor para ensayos de electroluminiscencia.

4.5. Diseño de Laboratorio Indoor de EL para Módulos FV

Finalmente, tras lo señalado en los apartados anteriores de esta Sección, se procede a presentar el diseño final del Laboratorio Indoor de EL para Módulos FV.

En comparación con la Figura XXXII, se muestra en la Figura XL el espacio asignado dentro de las dependencias del Laboratorio AT. Las diferencias entre ambas versiones del Layout son asociados a requerimientos de espacio y a la separación de la Jaula de Faraday en los Laboratorios de Degradación UV y el de EL.

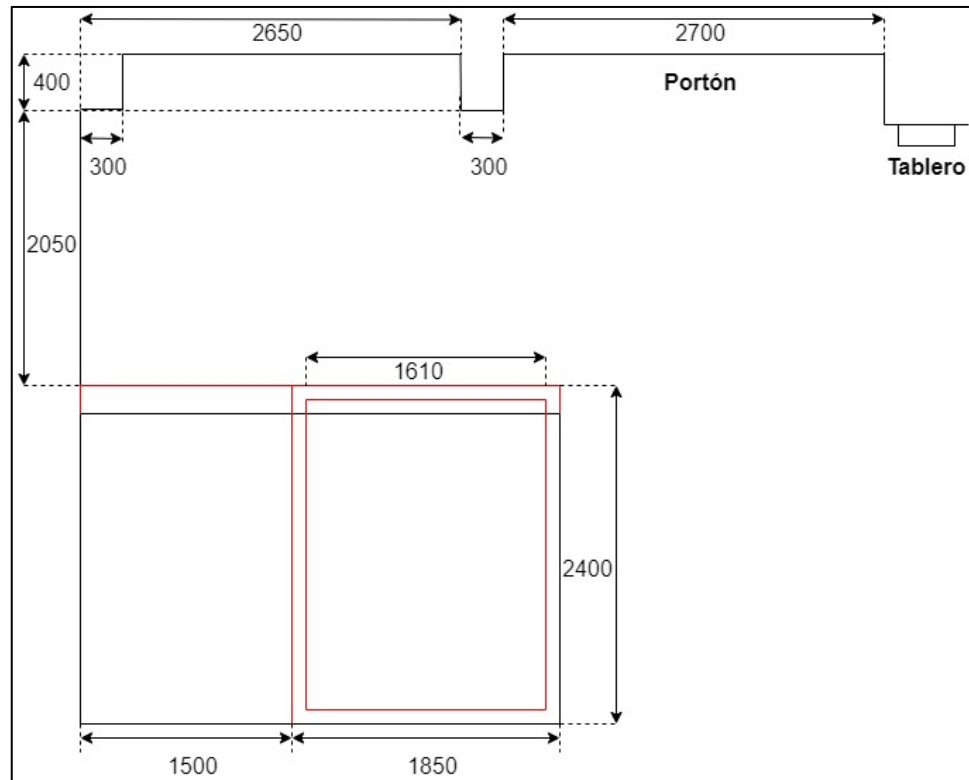


Figura XL. Layout actual del espacio en el Laboratorio AT, se observa la Jaula de Faraday y su espacio aledaño, se aprecian en rojo las modificaciones solicitadas a la jaula. Dimensiones de longitud en milímetros [mm].

Las dimensiones del espacio son:

- Superficie interior total del piso (Considerando el espacio ocupado en las paredes para la instalación del aislamiento térmico): 3,6 [m²].
- Ancho pared menor (que se visualiza horizontalmente en el Layout de la Figura XL) 1,5 [m].
- Ancho pared mayor (que se visualiza verticalmente en el Layout de la Figura XL) 2,4 [m].
- Altura de paredes: 3,05 [m].
- Su distancia al tablero nuevo propuesto es: Aproximadamente 2,05 [m]

Otros datos relevantes:

- Las paredes están hechas de planchas de acero inoxidable de 1 [mm] de espesor, con marcos de perfil de aluminio estructural.

- El piso se compone de palmetas de caucho de alta densidad de 15 mm de espesor.
- El material de la muralla entre laboratorios es lana de vidrio aislante de 120 [mm] de espesor, encapsulada con planchas de acero inoxidable de 1 [mm] de grosor

Se realiza un modelo 3D en el software SketchUp, para poder visualizar óptimamente las dimensiones de los implementos, los espacios dentro del laboratorio y la distribución de elementos para realizar el ensayo:

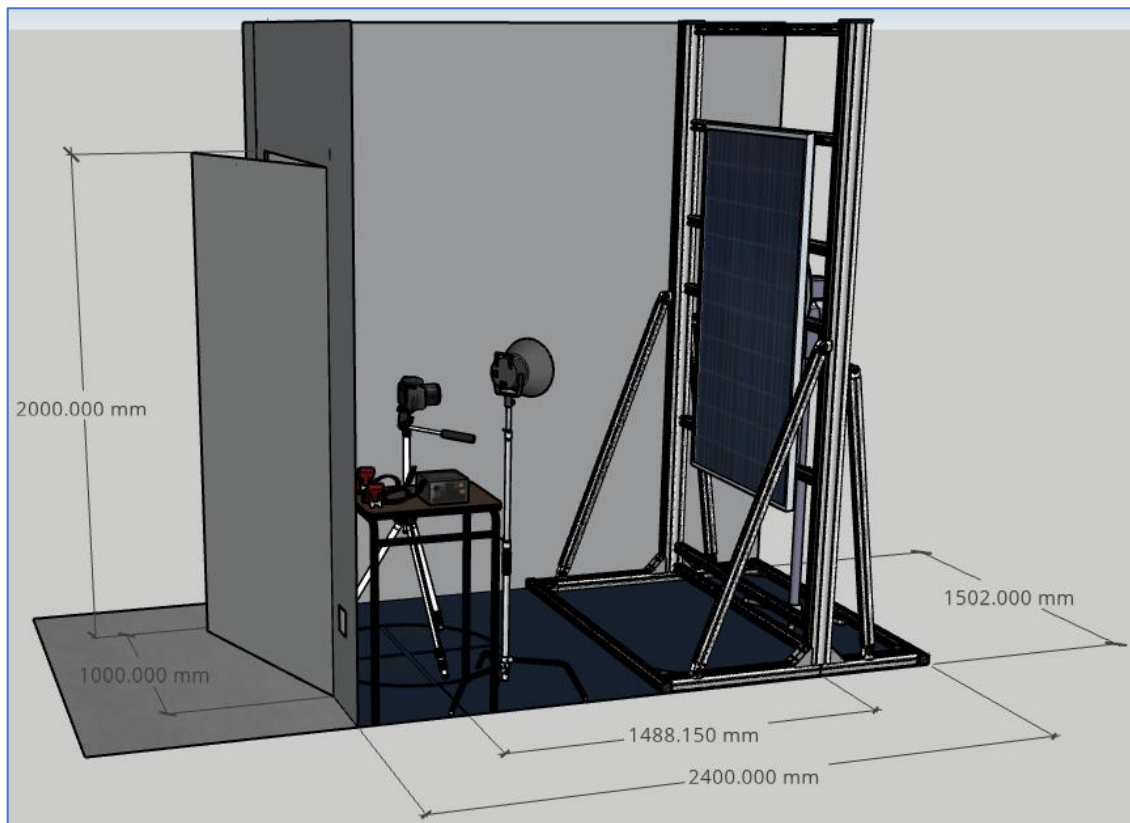


Figura XLI. Vista acotada del Laboratorio EL Indoor Modelo 3D SketchUp

Se observan en la Figura XLI las dimensiones generales del laboratorio y la distribución de los implementos mencionados, las dimensiones de la puerta se establecen considerando que el desensamble parcial de la estructura de módulos debe ser la menor posible para poder sacarla del laboratorio. Se observa también que la configuración respeta la distancia mínima entre cámara y módulo, que en este caso no es un valor

mandatorio ya que la cámara tiene un lente gran angular, por lo que a una distancia menor aún se puede visualizar todo el módulo.

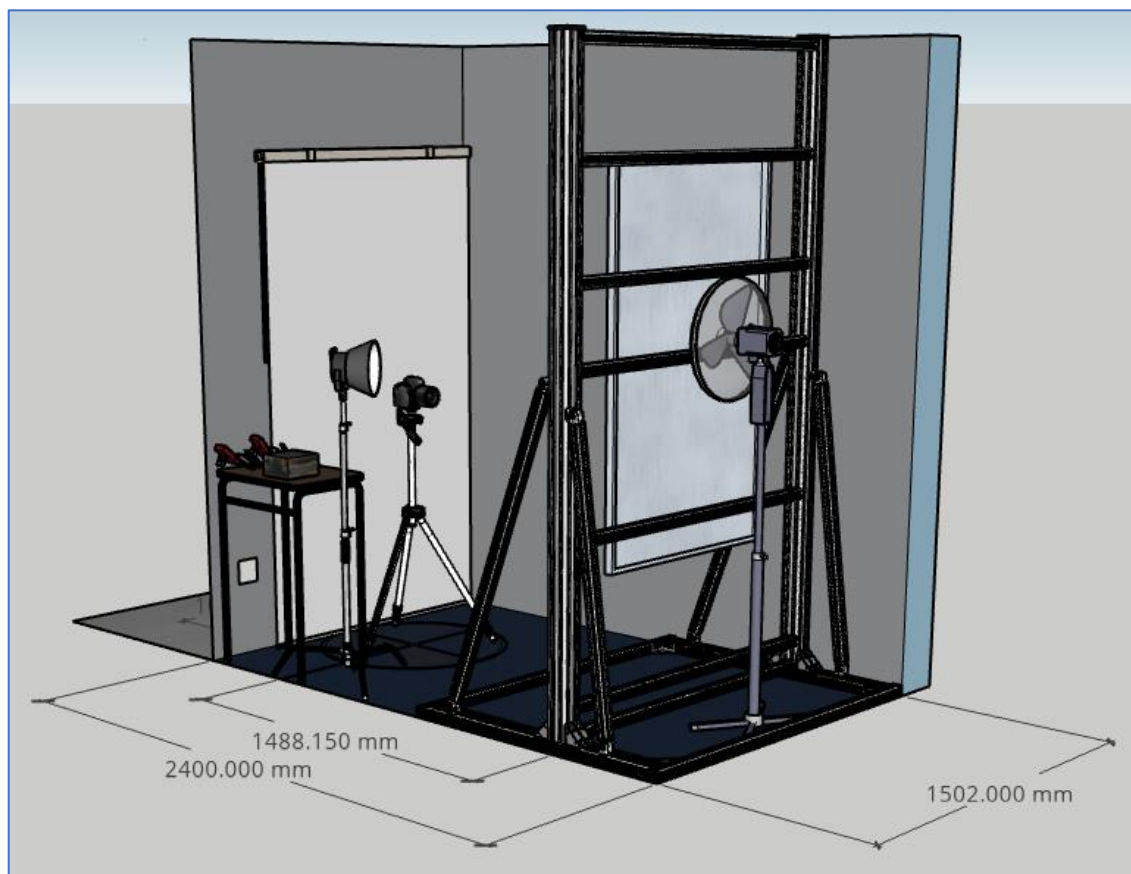


Figura XLII. Vista acotada del Laboratorio EL Indoor. Modelo 3D SketchUp

En la Figura XLII se puede apreciar el laboratorio desde la parte posterior de la estructura de soporte, en donde se observa la unidad de enfriamiento. Dado que el espacio tras el módulo es reducido y se busca conservar la homogeneidad térmica en el módulo, se puede apreciar que la o las unidades deben tener oscilador en dirección vertical. Se observa también que la cortina roller cubre todo el espacio de la puerta.

En la Figura XLIII se ve el laboratorio desde la perspectiva superior, destacando el espacio que debe estar marcado en el piso para la colocación del trípode con la cámara. También se observa que la ubicación de la cámara debe ajustarse con la puerta abierta, por condiciones de espacio. Sin embargo, esto último no representa un inconveniente para la metodología del ensayo.

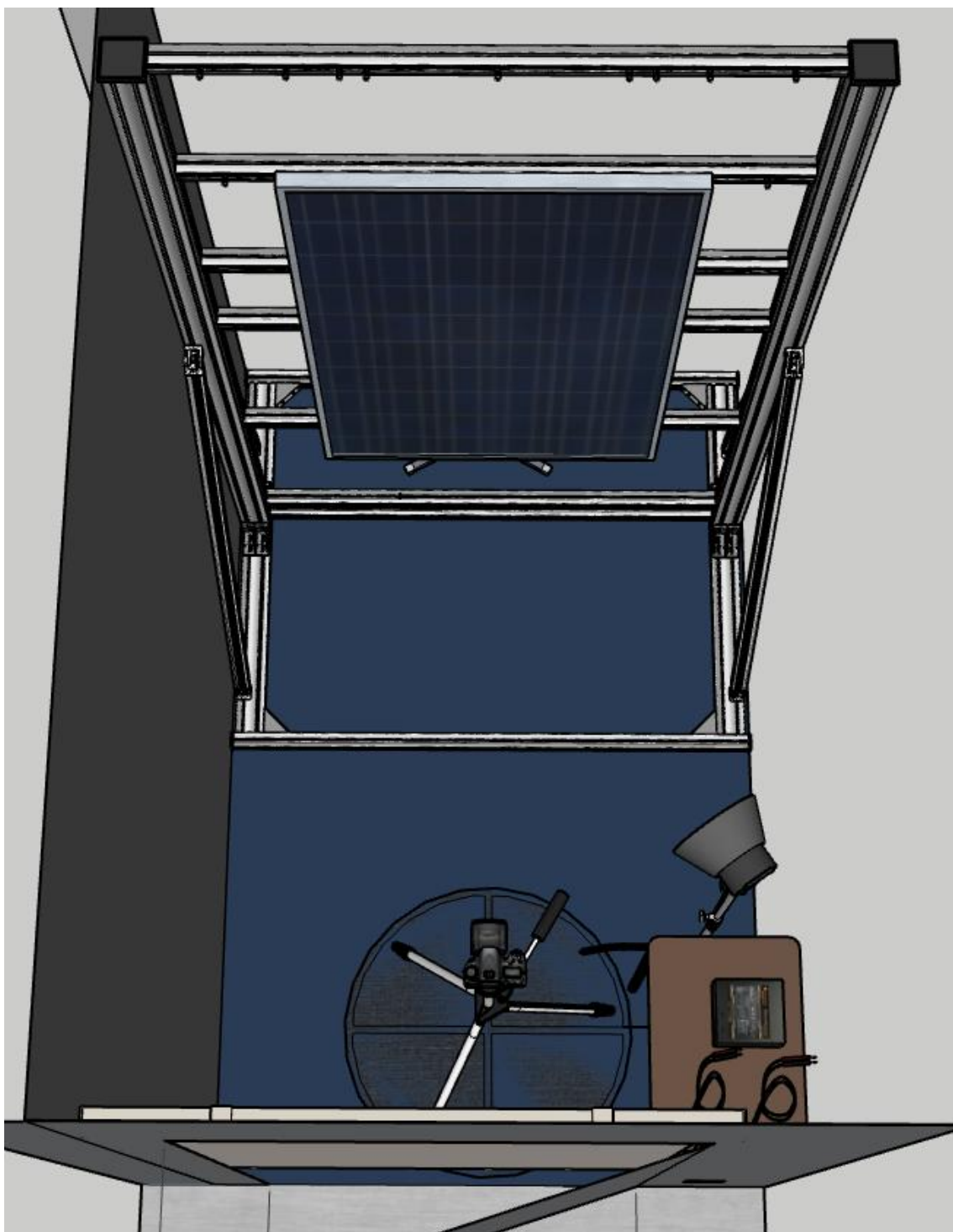


Figura XLIII. Vista superior del Laboratorio EL Indoor. Modelo 3D SketchUp

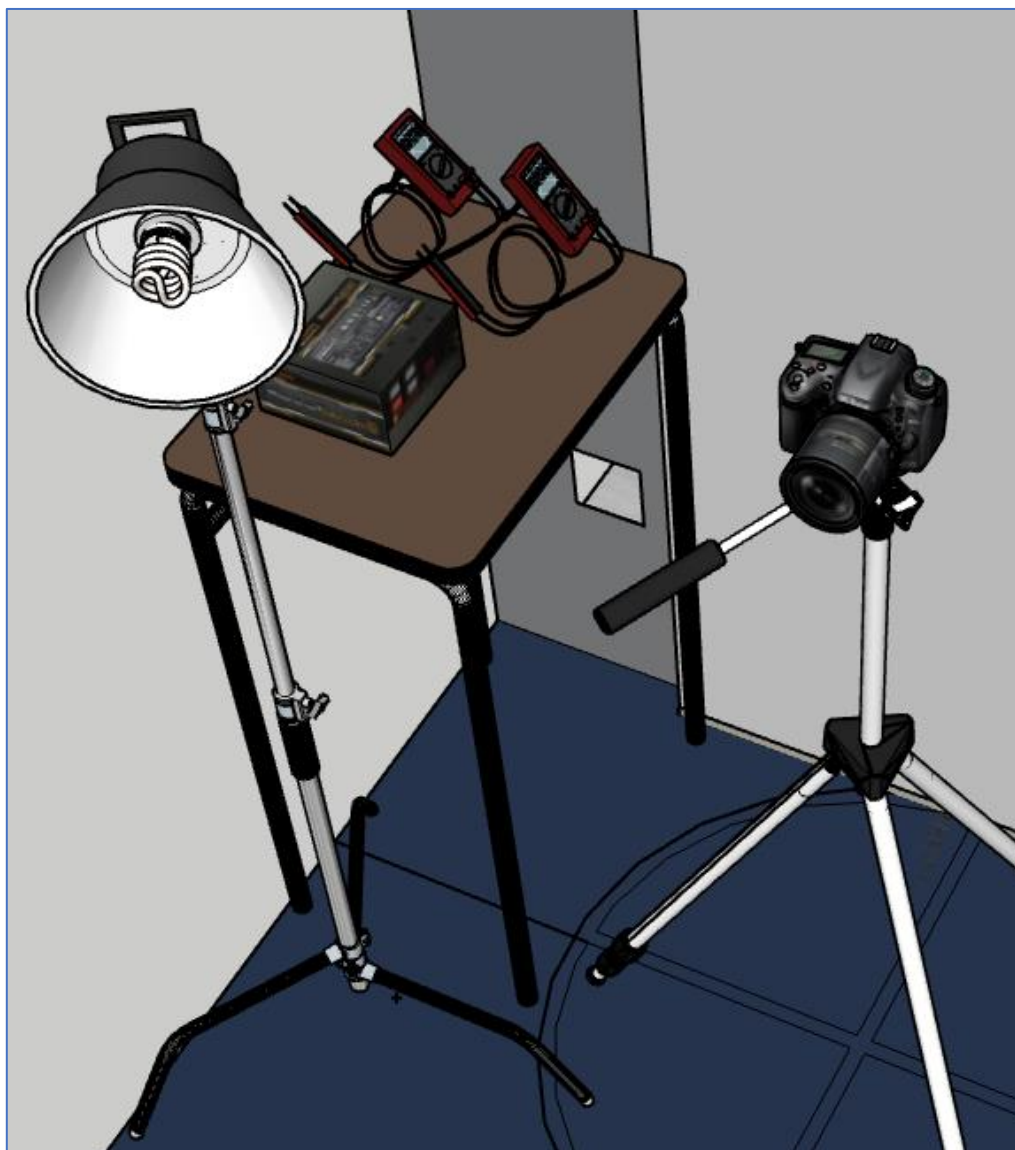


Figura XLIV. Detalle de equipos eléctricos, iluminación y pasacables del Laboratorio EL Indoor. Modelo 3D SketchUp

En la Figura XLIV se pueden observar dos equipos de medición que simbolizan el voltímetro, amperímetro o multímetro requerido en el ensayo, la fuente de tensión representada sería aplicable para módulos de corrientes I_{sc} bajas, ya que para corrientes mayores es probable que se requieran equipos de mayor potencia. La iluminación, al igual que las unidades de enfriamiento, debe ser de pedestal, ya que todo el Set Up del Laboratorio deber ser fácil de retirar, también es necesario que tenga la mayor movilidad posible para apuntar fácilmente tanto a los equipos como al soporte de módulos.

Establecido el diseño del laboratorio, es posible describir la metodología para realizar el ensayo de EL Indoor para módulos FV.

5. Metodología del Ensayo de EL Indoor para Módulos FV

5.1. Definición del ensayo

El objetivo del ensayo de Electroluminiscencia Indoor es realizar fotografías dentro de un laboratorio o ambiente controlado. Las capturas son de módulos fotovoltaicos que estén bajo este fenómeno físico y en un entorno oscuro, lo que permite optimizar la calidad de la imagen y permitir análisis para casi todo tipo de fines. El procedimiento corresponde a un ensayo no destructivo que requiere sacar al módulo de funcionamiento y ser trasladado a el laboratorio mencionado.

Dicho esto, tanto la estructura como los implementos del laboratorio definen las características de los ensayos que se pueden realizar en él. En este caso, las capacidades de los ensayos que se pueden realizar están definidos en las Secciones 4.1, 4.3.1, 4.3.2, y 4.3.3. de este documento. Dentro de estos márgenes, se desarrolla una metodología que sigue las directrices de la norma 60904-13 y responde al diseño del laboratorio descrito en la Sección 4:

- Una etapa de montaje de implementos y equipos, ya que, como se menciona en las secciones anteriores, el laboratorio EL Indoor no es la única finalidad del espacio en el que es implementado. Por esta razón, se deben considerar pasos previos de “set up” previos al ensayo como tal.
- La captura de una imagen del módulo en oscuridad sometido a una polarización alta, a un valor cercano al de su corriente de corto circuito I_{SC} . Bajo estas condiciones el módulo muestra un alto nivel de luminosidad y permite obtener capturas sin requerir largos tiempos de exposición.
- La captura de una imagen del módulo en oscuridad sometido a una polarización baja, específicamente a una corriente equivalente al 10% de su corriente de corto circuito I_{SC} . El ensayo a este nivel de corriente tiene varios usos, entre ellos destaca la identificación de Degradación por Potencial Inducido (PID) o de cracking tipo B (International Electrotechnical Commission, 2018) y distintas aplicaciones de análisis cuantitativo, como el análisis de histogramas o la obtención de resistencia en paralelo (Górriz, 2014). Para obtener una buena captura con un contraste distinguible, generalmente se requieren tiempos de

exposición mucho más largos que para el ensayo de alta polarización, lo que puede involucrar problemas de sobrecalentamiento del módulo. Es por esta razón que se realiza después de la captura de alta polarización, porque evita el caso que el módulo requiera un tiempo de enfriamiento (natural o forzado) antes de realizar la segunda captura.

- El último paso consiste en la captura de imagen con el módulo apagado, se apaga la fuente y se realiza la captura en oscuridad, con los mismos parámetros de cámara usados para las otras dos capturas. Esta parte tiene por fin capturar la luz extraviada presente durante los otros ensayos

Está pensado para realizarse en grandes volúmenes de módulos (lotes) bajo condiciones prácticamente idénticas (parámetros de cámara, temperatura del módulo, corriente de polarización, etc), por lo que se recomienda realizarse en el menos tiempo posible por módulo y en una misma instancia por lote.

5.2. Alcances del Ensayo

El alcance de esta metodología de ensayo contempla desde la preparación del laboratorio o “Set Up” hasta la realización de la captura con el módulo apagado, agregando recomendaciones y casos de estudio para distintos tipos de fallas. Si bien el trabajo presenta o introduce algunos modelos de procesamiento y análisis de imágenes, la presente metodología no contempla etapas de procesamiento o edición de imágenes, ni aplicación de ningún método cuantitativo para el análisis de celdas o módulos.

Lo que se busca es plantear un marco inicial que permita profundizar las líneas de investigación que se pueden desprender de la Norma IEC 60904-13, las cuales son abordadas en la Sección 7 de este trabajo. Además de producir imágenes de alta calidad que permitan su estudio con diversos fines.

La metodología puede ser aplicada para módulos de cualquier tamaño, con todo tipo de fallas (sólo se podrá generar diagnóstico de las fallas ya definidas que detecta la EL), de material de silicio tanto monocristalino como policristalino, monofacial o bifacial. También puede ser aplicado a otras tecnologías de módulos cuya respuesta espectral de EL sea similar a la del silicio (que la mayor parte de la respuesta se

encuentre en longitudes de onda superior es a 850 [nm]). También es importante considerar que, dado el sistema de soporte de módulos, la metodología sólo aplica para módulos fotovoltaicos que cuenten con su marco de aluminio correspondiente.

5.3. Pruebas Preliminares

Si bien en la Sección 3.7.11 se dictan recomendaciones respecto a los parámetros de configuración de la cámara, es decir, Sensibilidad ISO, Apertura del Diafragma f y tiempo de obturación (Sección 3.6.11, 3.6.12 y 3.6.13), la Norma IEC 60904-13 no establece parámetros recomendados (International Electrotechnical Commission, 2018). Esto se debe a que la mejor configuración posible puede variar según lo que se busque analizar en las imágenes, además existen varios factores a considerar, como la calidad de imagen requerida, los tiempos que se busca destinar para el ensayo o el mismo módulo / grupo de módulos que se busca ensayar (considerando que la luminosidad es directamente proporcional a la potencia del módulo, en módulos de distinta eficiencia no pueden ser óptimos los mismos parámetros).

Pero para efectos de este trabajo, es importante fijar parámetros de referencia, los cuales son obtenidos mediante ensayo y error durante Pruebas Preliminares, que también se realizan con el fin de establecer directrices adicionales para el diseño y la elaboración de esta misma metodología.

Las Pruebas Preliminares son realizadas en un espacio interior oscuro (Jaula de Faraday en su estado inicial, Sección 4.2), pero que no cuenta con los estándares de un laboratorio EL Indoor. Las condiciones de estas Pruebas son las siguientes:

- Nivel de oscuridad bajo el estándar del laboratorio (existen filtraciones de luz).
- No se utiliza el monitoreo de la temperatura del módulo, ni se cuenta con unidades de enfriamiento, en caso de exceso de temperatura notable.
- El módulo no se encuentra en posición perpendicular al eje de visión de la cámara.
- Todas las capturas son realizadas a corriente I_{SC} . No es verificado el rango de tolerancia aceptable (se señala en la Sección 5.4).

- La cámara cuenta con la modificación requerida en su sensor y cuenta con el filtro de luz visible en su lente, las condiciones de estabilidad del dispositivo (piso y trípode) son muy cercanas a las del laboratorio.
- Se cumplen las condiciones de limpieza del módulo, humedad relativa ambiental y de ausencia de corrientes de aire.
- Se utiliza un obturador remoto sin cable, por lo que se requiere dejar un espacio abierto en la puerta de la sala por el instante en que se presiona el obturador, lo que implica infiltraciones de luz, no deseadas en todas las capturas.

Si bien se muestran varias desviaciones respecto a las condiciones óptimas del laboratorio, la calidad, a partir de esas condiciones, no puede empeorar. Por lo que los parámetros que se obtengan deben tener mejores resultados dentro del ambiente estandarizado.

Dentro de los módulos ensayados en esta instancia, se encuentran los siguientes casos, con sus respectivos parámetros de cámara:

- El primer módulo corresponde a un módulo mediano de 6 x 12 celdas (dimensiones aproximadas de 150 [cm] de alto y 70 [cm] de ancho) de silicio policristalino, con visibles señales de cracking (divisibles en exterior, de día). Figuras XLV, XLVI y XLVII.

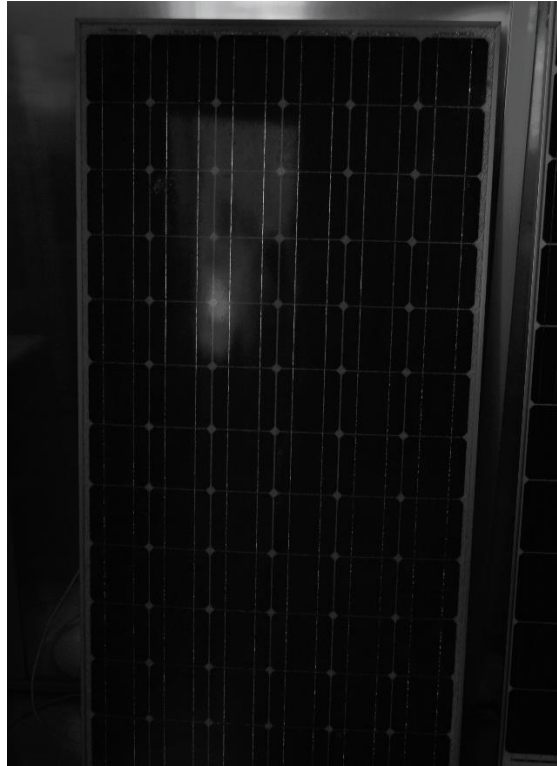


Figura XLV. Captura de módulo bajo luz natural (escala de grises), en ambiente interior oscuro, pero con puerta abierta.



Figura XLVI. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{sc} . Parámetros: ISO 100 - Apertura $f/4$ - Tiempo de Exposición 20 segundos.

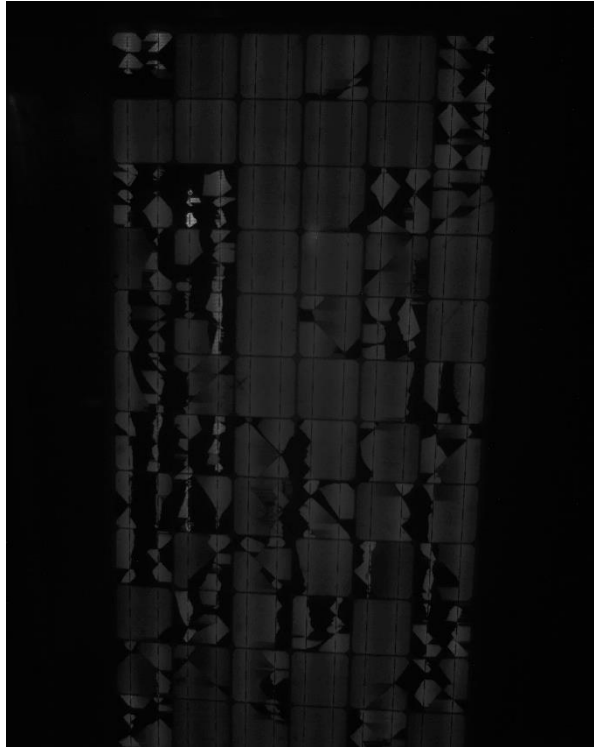


Figura XLVII. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{sc} . Parámetros: ISO 500 - Apertura $f/5$ - Tiempo de Exposición 25 segundos.

- El segundo módulo corresponde a un módulo grande de 6x12 celdas (dimensiones aproximadas de 200 [cm] de alto y 100 [cm] de ancho) de tecnología bifacial, sin uso. Figuras XLVIII, XLIX y XLX.



Figura XLVIII. Captura de módulo bajo luz natural (escala de grises), en ambiente interior oscuro, pero con puerta abierta.



Figura XLIX. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{sc} . Parámetros: ISO 100 - Apertura $f/5$ - Tiempo de Exposición 60 segundos.



Figura L. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{sc} . Parámetros: ISO 500 - Apertura $f/5$ - Tiempo de Exposición 25 segundos.

- El tercer módulo corresponde a un módulo pequeño de 2x2 celdas (dimensiones aproximadas de 40 [cm] de alto y 40 [cm] de ancho) de tecnología bifacial, sin uso. Figuras LI, LII y LIII.



Figura LI. Captura normal de módulo en ambiente iluminado.

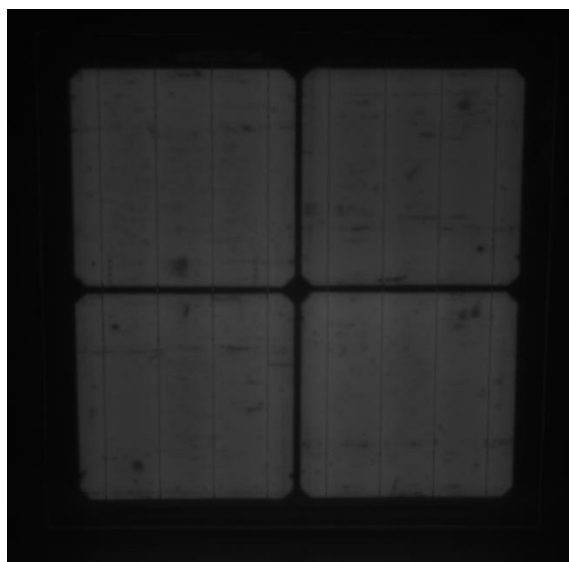


Figura LII. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{sc} . Parámetros: ISO 100 - Apertura $f/4$ - Tiempo de Exposición 20 segundos.

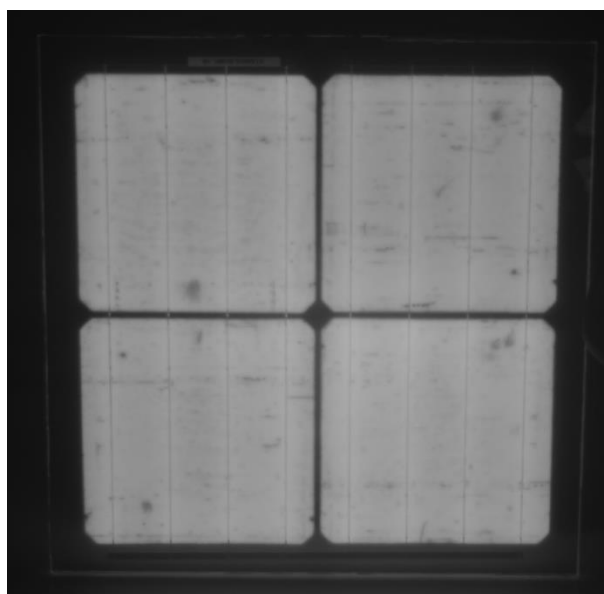


Figura LIII. Módulo en oscuridad y con inducción de corriente I_{sc} . Parámetros: ISO 500 - Apertura $f/4$ - Tiempo de Exposición 40 segundos.

Tras estos resultados, se realiza un análisis cualitativo y se determina el trío de parámetros ISO 500 - Apertura $f/5$ - Tiempo de Exposición 25 segundos, correspondientes a la Figura L, como la referencia para la metodología.

5.4. Metodología Paso a Paso

Considerando los estándares de la Norma 60904-13 y el diseño del laboratorio descrito en la Sección 4, se presenta la siguiente metodología, para el Ensayo de Electroluminiscencia Indoor para Módulos Fotovoltaicos:

5.4.1. Primera parte, Preparación / Set Up:

- a. Ubicación de Estructura de Soporte – Se necesita un desarme parcial de la estructura para entrar al laboratorio, se recomienda soltar la sujeción inferior de las columnas verticales y los soportes diagonales, de esta forma se separa la estructura en dos piezas, mucho más fáciles de ingresar y ubicar en el laboratorio.
- b. Ubicación de Implementos Secundarios – El orden recomendado es: Unidades de refrigeración, mesa para equipos, lámpara y equipos (fuente de poder, amperímetro y voltímetro). En caso de que la fuente de poder sea de dimensiones que no permita su ubicación sobre la mesa, se puede dejar bajo ella. Tener en consideración que se deben ubicar los equipos, si es posible, sin su respectivo cableado. Las unidades de refrigeración deben ubicarse de tal forma que, considerando su oscilación vertical.
- c. Colocación del Módulo – Dependiendo del tamaño del módulo, este puede ser ubicado en cualquiera de los 3 niveles de ganchos con los que cuenta la estructura. El sensor de temperatura debe ser adherido a la cara opuesta que se va a ensayar (considerando que pueden ser módulos bifaciales) en idealmente dos puntos representativos del módulo, se sugiere ubicar a lo largo del eje central del módulo (vertical) en dos puntos equidistantes entre sí y a su vez equidistante al marco del módulo. En caso de que se cuente con un termostato, conectar con las unidades de enfriamiento, las cuales deben estar configuradas en oscilación vertical.
- d. Cableado y Pasacables – Se coloca el cableado de los equipos según la configuración mostrada en la Figura LIV, que muestra una representación muy simplificada del módulo y la conexión de equipos para hacer el ensayo de EL, en esta se nota que la conexión respecto al módulo debe ser en paralelo y en serie para el voltímetro y el amperímetro respectivamente. Las conexiones al

tablero exterior de todos los equipos, del obturador, de la lámpara y de las unidades de enfriamiento se pasan por el pasacables para ser conectados desde el exterior al tablero más cercano (verificar previamente que todos los equipos estén en modo apagado).

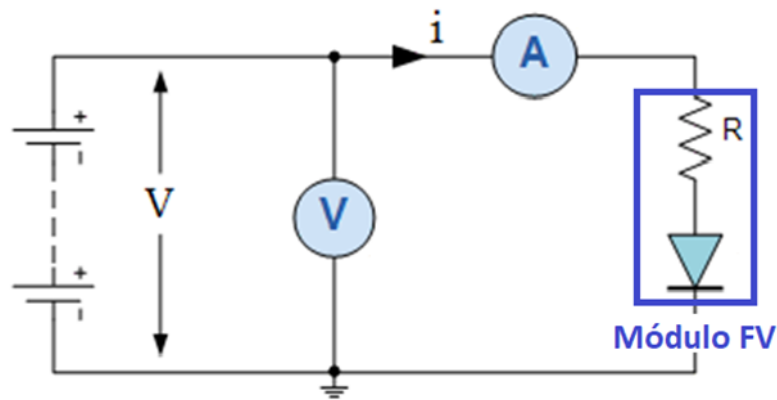


Figura LIV. Representación simplificada de la configuración de equipos de medición y el módulo FV (F. A. Lindholm, 1979)

e. Montaje de Trípode y Cámara – Fijar la altura de la cámara en base a la posición que haya quedado el módulo, asegurar la correcta estabilidad y la restricción de movimiento en el trípode. La ubicación de la cámara debe ser cercano al punto central del círculo marcado en el piso (Figura XLIII) y los pies del trípode deben estar dentro del mismo. Ajustar el lente para que se visualice el módulo completo y que un 10% de la imagen corresponda a un área externa al módulo.

f. Configurar Parámetros de Cámara – Asegurar que la cámara se encuentre en escala de grises y que cuente con el filtro de luz visible montado en el lente. Configurar la cámara con los parámetros obtenidos experimentalmente en la Sección 5.3, es decir, ISO 500 - Apertura f/5 - Tiempo de Exposición 25 segundos. Finalmente conectar el cable del obturador a la cámara y verificar su funcionamiento con una captura con el módulo iluminado.

g. Energizado de equipos – Encender todos los equipos, mantener la fuente inicialmente en 0 [V], configurar rangos o incertidumbre de medición según los valores I_{SC} y V_{OC} del módulo.

5.4.2. Segunda parte, realización de capturas:

- a. Inducir I_{SC} al módulo - Inducir Voltaje paulatinamente al módulo hasta que alcance su corriente I_{SC} . Una vez alcanzado este punto, verificar si se comporta de manera regular (Al inducir V_{OC} se alcanza I_{SC}). Esperar a que la corriente que circula por el módulo se estabilice en (u oscile en torno a) un valor de corriente dentro del rango $I_{SC} \pm 3\%$.
- b. Esperar equilibrio térmico – Simultáneamente a la estabilización de la corriente, se debe cumplir también que el módulo alcance equilibrio térmico (entre 20°C y 30°C). En caso de tener unidades de enfriamiento, encenderlas si el valor supera la cota superior requerida, hasta que llegue a un valor cercano y no menor a 20°C . En caso de también tener termostato, verificar que se apague el sistema antes de realizar la captura.
- c. Realizar Captura desde fuera del Laboratorio – Una vez verificadas las condiciones señaladas en el paso anterior, apagar la luz, apagar el ventilador, cubrir la pantalla de cualquier dispositivo, salir del laboratorio, bajar la cortina blackout, cerrar la puerta del laboratorio y presionar el obturador de la cámara.
- d. Registrar Variables – Transcurridos 15 [s] después de la captura, registrar la corriente que indica el amperímetro, el voltaje que indica el voltímetro y la temperatura que indica el sensor o termostato.
- e. Realizar el mismo procedimiento a 10% de I_{SC} y con el módulo sin energizar – Si el objetivo es obtener capturas sólo para análisis cualitativo sin procesamiento de imágenes previo, para la captura a 10% de I_{SC} se puede variar solamente el tiempo de exposición de la cámara. Esto se recomienda para obtener mejores resultados en esa captura. Para la captura sin energizar se deben siempre usar los mismos parámetros que la captura a I_{SC} .
- f. Pasar al siguiente módulo y repetir el procedimiento.

5.4.3. Tercera parte, elaboración de reporte

Considerando las directrices de la Norma IEC 60904-13 explicadas en la Sección 3.7.17 y tras realizar las capturas del módulo o lote de módulos y haberlas visualizado, se debe elaborar un reporte que contenga lo siguiente (Anexo 10.5):

- Objetivo del ensayo.
- ID del lote.
- Captura de prueba del lote (luz visible, a color, sólo 1 registro por lote).
- ID del módulo.
- Voltaje (1 registro por captura).
- Corriente (1 registro por captura).
- Parámetros de cámara: Sensibilidad ISO, Apertura f y Tiempo de Exposición (1 registro por captura).
- Nombres de archivo de las 3 capturas.
- Cualquier desviación respecto a la metodología previamente detallada.
- Diagnóstico preliminar de cada módulo (opcional, excluye la captura a módulo sin energizar).

5.5. Consideraciones Importantes

Adicionalmente a los pasos descritos en la Sección 5.4, Se deben tener las siguientes consideraciones:

- La metodología descrita en la Sección 5.4 considera un escenario en que el laboratorio se encuentre inicialmente desmontado en su totalidad. Se recomienda tomar un primer paso de estimación de tiempo requerido, dependiendo del estado inicial del laboratorio y del tamaño de el o los lotes de módulos que se buscan evaluar.
- El ensayo debe realizarse mínimo de a dos personas, en primer lugar, para respetar las políticas de seguridad del laboratorio de AT y, en segundo lugar, para hacer viable el traslado y montaje de implementos y equipos.
- Tanto las unidades de refrigeración como el termostato son equipos opcionales, ya que para el tiempo de exposición fijo señalado en la metodología, no se tienen problemas de sobrecalentamiento del módulo.
- La captura con el módulo sin energizar, para el alcance de esta metodología, tiene como fin tomar una muestra de la luz extraviada de forma cualitativa.

6. Metodología de Procesamiento y Análisis Cualitativo de Imágenes EL para Caracterización de Módulos FV

6.1. Definición y Alcances de la Metodología

Considerando que la metodología de ensayo de Electroluminiscencia detallada en la Sección 5 abarca el proceso de diagnóstico de módulos fotovoltaicos hasta la etapa de la elaboración de reporte del ensayo, sin entrar al análisis de las imágenes obtenidas. En la Sección 3.7 se señalan varias formas de procesamiento y análisis de imágenes, dentro de estas posibilidades, la presente metodología busca realizar un análisis semiautomatizado de las capturas identificando la presencia de cracking. Todos los códigos de programación en esta metodología se desarrollan en Python, mediante Jupyter Notebook.

Describiendo la metodología a grandes rasgos, se toma de entrada la imagen de EL del módulo a corriente I_{SC} , se divide/analiza a nivel de celda y finalmente se realiza un diagnóstico del módulo completo. El análisis se hace mediante un algoritmo de aprendizaje de máquinas y busca detectar cracking de cualquier tipo (A, B y C), sin distinguir entre ellos, es decir, realiza una clasificación binaria: “Cracking” o “No Cracking”. La descripción detallada se encuentra en la Sección 6.3.

Esto puede aplicarse a cualquier imagen o grupo de imágenes de EL de módulo(s) o celda(s) fotovoltaica(s) que haya(n) sido ensayada(s) por la metodología descrita en la Sección 5 y que no tengan celdas completamente inoperativas (se visualizan totalmente oscuras en la captura). Además, puede ser aplicado a cualquier captura de electroluminiscencia que cumpla con las siguientes características:

- La captura debe estar en escala de grises.
- La captura debe haber sido tomada con el módulo a I_{SC} .
- De Silicio Monocristalino o Policristalino, monofacial o bifacial.
- Con 2 o 3 “*bus bars*” por celda, los “*bus bars*” son líneas conductoras que transportan la corriente DC generada en las celdas (o la inducida a las celdas en el ensayo de EL). Figuras LV y LVI.

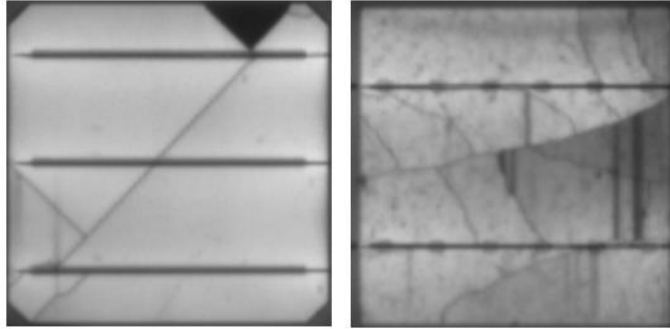


Figura LV. Imagen de EL de celdas con cracking, a la izquierda se ve una celda con 3 bus bars y a la derecha una celda con solo 2 de ellas.

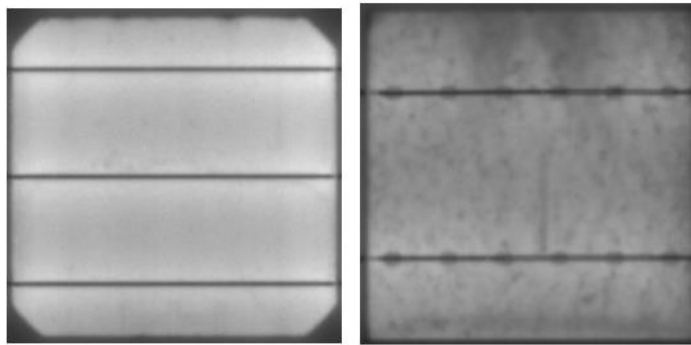


Figura LVI. Imagen de EL de celdas sin cracking, a la izquierda se ve una celda con 3 bus bars y a la derecha una celda con solo 2 de ellas.

- Los *bus bars* pueden ser de espesor continuo o de patrón “*dash line*” (línea punteada en español), este patrón permite un menor gasto de material para la manufactura de los módulos, pero tienden a ser más sensibles a sufrir cracking y degradación (powerfromsunlight.com, 2017). Figura LVII.

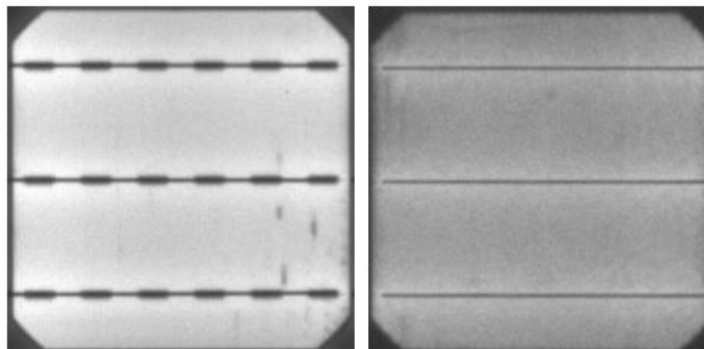


Figura LVII. Imagen de EL de celdas, a la izquierda se ve una celda de bus bars con patrón dash line y a la derecha una celda de bus bars con espesor continuo.

Actualmente, se han desarrollado dos trabajos que comparten características con el que se presenta en este documento, uno fue realizado por a.h.a.l.m. Elektronik GMBH en Frankfurt, Alemania (Milan Alt, 2018) y el otro por la Ohio Western Reserve University en conjunto con el SDLE Research Center (Ahmad Maroof Karimi, 2018) . En estos trabajos también se realizan metodologías para la caracterización de celdas fotovoltaicas ensayadas por electroluminiscencia, pero abarcando más tipos de fallas y orientando el análisis a un enfoque cuantitativo-estadístico, que busca llegar a métricas de probabilidades de presencia de fallas específicas y de probabilidad de falla de la celda.

6.2. Base de Datos

Para el desarrollo de la metodología y específicamente para el modelo de aprendizaje de máquina, se requiere una muestra de módulos con cierto volumen mínimo viable. En este caso se usa el dataset de celdas (Figura LVIII) disponible en el repositorio “A Benchmark for Visual Identification of Defective Solar Cells in Electroluminescence Imagery” (ZAE Bayern, 2018) (Buerhop-Lutz, y otros, 2018) (Sergiu Deitsch, 2021) (Deitsch, y otros, 2019).

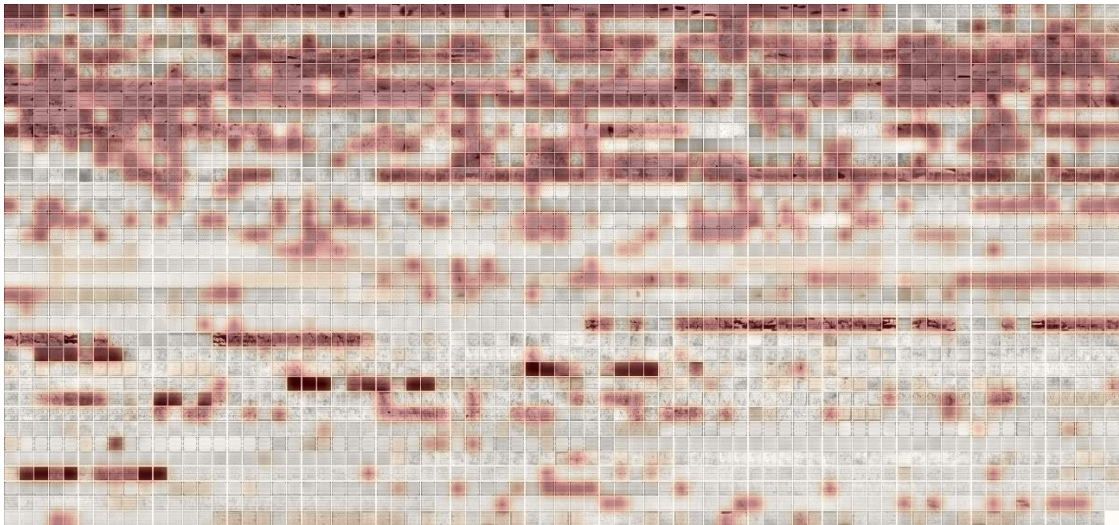


Figura LVIII. Overview de la muestra completa de imágenes de celdas ensayadas por EL, si bien en esta vista no se representa de esa forma, el total de imágenes se encuentra en escala de grises.

El dataset contiene 2.624 muestras de imágenes de 300x300 píxeles en 8-bit, todas ellas en escala de grises. Entre ellas se encuentran celdas sanas y con distintos tipos de defectos, como, por ejemplo, degradación, filtraciones de humedad y principalmente cracking (tipo A, B y C). Las imágenes vienen de ensayos EL a 44 módulos diferentes,

mono y policristalinos. Cada imagen está acompañada de un indicador que cuantifica la probabilidad de que la celda tenga algún tipo de daño, pero esta información no es utilizada en este trabajo, ya que se busca aislar la variable de la presencia de cracking (indistinto de su tipo).

Al realizar una caracterización manual de la información entre las celdas que tienen y no tienen cracking, se obtiene que el volumen de información de celdas sin cracking es mucho mayor, por lo que se reduce su volumen hasta igualar al de las celdas con cracking, dejando un total de aproximadamente 800 imágenes, compuestos por dos muestras (cracking y no cracking) de aproximadamente 400 imágenes cada una.

Este volumen resulta insuficiente para poder entrenar al modelo de aprendizaje de máquinas, por lo que se procede a aplicar un algoritmo de ampliación de data, mediante la función *cv2.flip()* de la biblioteca de visión artificial *OpenCV*, la cual voltea la imagen respecto a diferentes ejes (Anexo 10.3). En este caso se realiza volteando la imagen respecto al eje y, volteando respecto al eje x y finalmente volteando en ambos ejes. Esto permite aumentar el volumen de la data considerablemente y la data adicional sí agrega valor al entrenamiento del modelo.

Tras aplicar este algoritmo al dataset, se obtiene un volumen de datos de más de 3000 imágenes, nuevamente divididas en dos muestras de aproximadamente 1500 imágenes cada una. Este volumen es suficiente para poder entrenar y validar el modelo de aprendizaje de máquinas que es medular en la presente metodología.

6.3. Metodología de Procesamiento de Imágenes de EL

En complemento a lo introducido en la Sección 6.1, la metodología consiste en 4 etapas, las cuales se señalan en la Figura LIX. El detalle de cada una se explica desde la Sección 6.3.1 a la Sección 6.3.4. Se requiere usar la metodología completa para un módulo a la vez. Toda la metodología se ejecuta en el código “Ejecutable_Metodologia” el cual se encuentra descrito bloque por bloque en el anexo (Anexo 10.4).

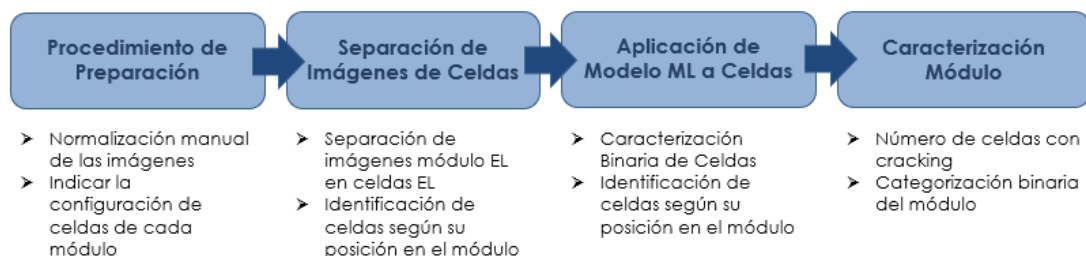


Figura LIX. Diagrama explicativo de la metodología de análisis de imágenes.

6.3.1. Procedimiento de Preparación

Como primer paso de la metodología, se necesita transformar la imagen de entrada (captura de electroluminiscencia de un módulo fotovoltaico) en imágenes de cada una de sus celdas. Para esto se realiza el siguiente procedimiento, que consta de 4 pasos:

- Configuración correcta de carpetas para la ejecución: En la carpeta de trabajo se debe encontrar el archivo ejecutable “Ejecutable_Metodología.ipynb” (que contiene todos los pasos descritos en la Sección 6.3), el clasificador de máquinas entrenado “ensayo.h5”, las imágenes de los módulos que se busca ensayar y una carpeta para que se guarden las celdas que son estudiadas en el algoritmo “Output_Algoritmo”
- Ingreso de directorios al código: Es necesario ingresar la ruta de la carpeta en que se van a tomar las fotos EL de módulos y se van a crear las imágenes de las celdas caracterizadas.
- Registro de módulo: Se registra el identificador del módulo (según reporte) y su respectivo nombre de archivo.
- Normalización de imágenes: Al ejecutar el primer bloque del código (sin considerar los que cargan librerías y funciones) aparecerá en una pantalla emergente el módulo registrado, el usuario debe marcar las 4 esquinas del módulo en la imagen, con la mayor precisión posible y en el siguiente orden: (1) esquina superior izquierda, (2) esquina superior derecha – (3) esquina inferior izquierda, (4) esquina inferior derecha. Finalmente, tras ingresar la confirmación de la selección de puntos, el algoritmo genera la imagen normalizada.

```

#AJUSTES DE ESCALADO + NORMALIZACIÓN

#Cargar imagen dentro de la libreria
imagen = cv2.imread(archivo,0)

#En caso de que la imagen original sea muy grande, con este parametro se puede achicar para mostrarse mejor
escala = 5

#Parámetros de escalado
largo = int(np.round(imagen.shape[0]/escala))
ancho = int(np.round(imagen.shape[1]/escala))

#Imagen redimensionada para mostrarse
img = cv2.resize(imagen,(largo,ancho))

#Imagen con corrección de perspectiva, los argumentos son: imagen a analizar, numero de columnas y numero de filas
corregida = generar_ROI(img,col_celdas,fil_celdas)

#ORDEN SELECCIÓN PUNTOS: 1.ArribaIzq - 2.ArribaDer - 3.AbajoIzq- 4.AbajoDer

Marcar puntos
Puntos guardados: 1
Puntos guardados: 2
Puntos guardados: 3
Puntos guardados: 4
Todos los puntos marcados.
Desea guardar los puntos (Si [1], No [2]): 1
Mostrando ROI
[[ 88.  81.]
 [357.  82.]
 [ 92. 400.]
 [348. 401.]]

```

Figura LX. Ejecución del algoritmo de normalización de imágenes EL de módulos FV, bajo el bloque de programación se observan los puntos previamente marcados en la ventana emergente del programa.



Figura LXI. Visualizador de imagen EL original ingresada al algoritmo.

```
#Ver imagen corregida
plt.matshow(corregida,cmap='gray')
<matplotlib.image.AxesImage at 0x2907685d580>
```

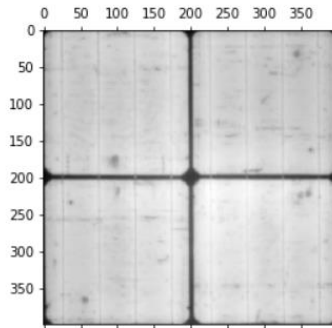


Figura LXII. Visualizador de imagen EL normalizada (corregida) al algoritmo.

6.3.2. Separación de Imágenes en Celdas

El usuario debe ingresar la configuración de celdas del módulo, es decir, el número de celdas a lo ancho y a lo largo del módulo, para que el algoritmo registre y guarde los archivos de cada celda en una carpeta predeterminada. Cada celda incluye su identificador que a su vez incluye el identificador de su respectivo módulo más su ubicación en este. Esta parte del procedimiento consiste simplemente en la división de la imagen según los valores de entrada ya señalados, guardando una imagen de cada división con su identificación en el nombre de archivo.

6.3.3. Análisis de Imágenes

Esta etapa representa la parte principal de la metodología, cuando se tiene la imagen normalizada y separada en celdas, es posible realizar una clasificación binaria entre las celdas que tienen y no tienen cracking. Para esto se desarrolla un modelo de aprendizaje de máquinas (Anexo 10.2). En base a un clasificador de imágenes genérico (Phan, 2020).

Para el desarrollo de este modelo se utilizan redes neuronales convolucionales en la biblioteca *Keras*, ejecutada sobre la plataforma *TensorFlow*. Para entrenar el modelo se utiliza una CNN (o su acrónimo en inglés CNN, de “convolutional neural network”) de dos capas, además, se configuran 20 Epochs (iteraciones). Las imágenes de celdas FV ensayadas provenientes del dataset descrito en la Sección 6.2 están manualmente caracterizadas, separadas en carpetas.

Como se menciona en la Sección 6.1, la caracterización de imágenes es binaria, “cracking” o “no cracking”. La proporción entre el volumen de data de entrenamiento y validación es de 80% y 20% respectivamente. El modelo se guarda con un 74,84% de precisión.

El modelo se ejecuta para cada celda inmediatamente después de la creación de esta, para un módulo, todas las celdas se separan, guardan y caracterizan en un mismo ciclo del código. La caracterización es posible verla en el mismo display de Python, y la comparación de cada celda es posible verla en la carpeta “Output_Algoritmo” mencionada en la Sección 6.3.1.

```
diag_m = 'NO'
cont_c_cracking = 0

#Generación dataset de celdas del módulo + Caracterización celdas
for f in range(0,fil_celdas):
    for c in range(0,col_celdas):
        a = corregida[200*f;200*(f+1),200*c:200*(c+1)]
        x = image.img_to_array(a)
        x = np.expand_dims(x,axis=0)

        #Guarda celda con id asignado "ID panel + ID fila + ID columna"
        cv2.imwrite(['Directorio']/Output_Algoritmo/'-i'+str(f)+'j'+str(c)+'.jpg',a)

        #Aplicación del modelo de ML
        prediccion = modelo.predict(x)

        if prediccion[0]<0.5:
            diag_a = 'presenta cracking'
            diag_m = 'Sf'
            cont_c_cracking = cont_c_cracking + 1
        else:
            diag_a = 'no presenta cracking'
        #print(prediccion)
        print('La celda '+id_módulo+'-i'+str(f)+'j'+str(c),diag_a)
```

La celda m1-i0j0 no presenta cracking
 La celda m1-i0j1 no presenta cracking
 La celda m1-i1j0 no presenta cracking
 La celda m1-i1j1 no presenta cracking

Figura LXIII. Bloque de programación ejecutado con el diagnóstico de las 4 celdas del módulo de las Figuras LXI y LXII

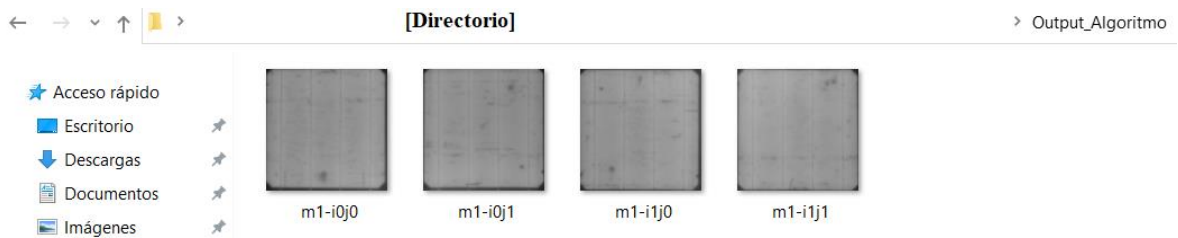


Figura LXIV. Imágenes EL de celdas FV generadas por el algoritmo, con su respectivo identificador de módulo y ubicación.

6.3.4. Caracterización del Módulo

Una vez realizada la caracterización de todas las celdas del módulo, se realiza un diagnóstico del módulo completo, utilizando el criterio de que, si una sola celda

presenta cracking, todo el módulo se caracteriza de esa forma (“el módulo [identificador] presenta cracking”). En el diagnóstico se incluye la cantidad de celdas con cracking identificado. Como paso final, se debe interrumpir manualmente el Kernel para poder pasar a la evaluación del siguiente módulo.

```
#Diagnóstico de módulo
print('El módulo '+id_módulo+' '+diag_m+' presenta cracking, se identificó cracking en '+str(cont_c_cracking)+' celdas')
El módulo m1 NO presenta cracking, se identificó cracking en 0 celdas
```

Figura LXV. Diagnóstico final del módulo, en base al diagnóstico de sus celdas.

7. Conclusiones

Se realizó una revisión completa del estado del arte relacionado al ensayo de electroluminiscencia. La investigación contempla principalmente el escenario actual, local y global, de la industria de generación fotovoltaica, las bases teóricas del fenómeno físico de la electroluminiscencia, principios aplicados de fotografía y finalmente aborda a fondo el estándar internacional vigente de la IEC 60904-13, el cual es la principal directriz para el presente trabajo.

Se generó una metodología del ensayo de electroluminiscencia en interiores para módulos fotovoltaicos, en base al estándar y la investigación antes mencionados, considerando una aplicación académica y con fines de análisis cualitativo. La metodología está pensada para ser aplicada en tecnologías de módulos de silicio cristalino (monocristalino y policristalino) de cualquier tamaño, monofacial y bifacial. También se ha tenido en consideración que la metodología puede servir como base para métodos de ensayo y análisis más sofisticados. La metodología consta de 3 etapas y un total de 14 sencillos pasos, incluyendo la estructura del reporte de ensayo.

Se diseñó el laboratorio para ensayos de electroluminiscencia, en base a la norma IEC 60904-13. La distribución de espacios, la implementación y sus respectivos requerimientos técnicos son definidos para que se realice la metodología de ensayo ya señalada.

Se desarrolla una metodología para el procesamiento y análisis de imágenes, propuesto como continuación a la metodología de ensayo, permite realizar un análisis cualitativo mediante un modelo de aprendizaje de máquinas (CNN, Keras, TensorFlow) a todas las celdas de cada módulo fotovoltaico. La metodología completa se realiza en Python Jupyter y requiere 4 sencillos y rápidos pasos para el usuario para ejecutarse. El modelo tiene una precisión del orden del 75%.

Finalmente, se puede concluir que se realizó el diseño de un laboratorio de interiores (“indoor”), acondicionado para realizar ensayos de electroluminiscencia a módulos fotovoltaicos, incluyendo su metodología de ensayo, procesamiento y análisis de imágenes.

8. Recomendaciones

Respecto al diseño del laboratorio y la metodología de ensayo, se debe considerar que es una tecnología que actualmente está siendo fuertemente impulsada, por lo que está teniendo un rápido desarrollo. Se pueden implementar mejoras en la calidad que se busca en la imagen, buscando estándares más altos de Sharpness y Signal to Noise Ratio, se pueden optimizar experimentalmente los parámetros de la cámara y el tiempo de ensayo, así como el post procesamiento de imágenes obtenidas, usando los métodos señalados en la IEC 60904-13. Con ciertos avances en la calidad de la imagen y el control de variables ambientales, se puede llegar a realizar un análisis cuantitativo, se puede tomar como referencia lo descrito en el estándar IEC 60747-5-9:2019, el cual ya permite generar métricas de eficiencia (eficiencia cuántica) en base a la luminosidad percibida en función de la temperatura.

Por su parte la metodología de procesamiento y análisis de imágenes puede mejorarse haciendo que el algoritmo de ampliación de datos incluya rotación de imágenes, para así poder evaluar el módulo en cualquier posición, independiente de la dirección de los bus bars. Ya que corresponde a un caracterizador binario, puede replicarse la información para otros tipos de fallas, como filtraciones de humedad o errores de manufactura. La data de entrenamiento del modelo se puede enriquecer realizando ensayos a muestras variadas de módulos y aplicando la metodología de este trabajo para separar las capturas en imágenes de celdas.

9. Referencias

- Acciona Chile. (2020). *Acciona Chile*. Obtenido de <https://www.accion.cl/proyectos/energia/fotovoltaica/planta-fotovoltaica-el-romero-solar/>
- ACERA. (2020). *Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento*. Obtenido de <https://acera.cl/mapa/#/map>
- Buerhop-Lutz, C., Deutsch, S., Maier, A., Gallwitz, F., Berger, S., Doll, B., . . . Camus, C. &. (2018). *A Benchmark for Visual Identification of Defective Solar Cells in Electroluminescence Imagery*.
- Cavieres, R. (2021). *Diseño de un algoritmo de evaluación del rendimiento de módulos fotovoltaicos en operación basado en análisis de imágenes*.
- Condés, O. (2019). *Xataka Foto*. Obtenido de <https://www.xatakafoto.com/guias/trianguulo-exposicion-explicado-graficamente#:~:text=El%20tri%C3%A1ngulo%20de%20exposici%C3%B3n%20l,otros%20para%20compensar%20su%20forma.>
- Deutsch, S., Christlein, V., Berger, S., Buerhop-Lutz, C., Maier, A., & Gallwitz, F. &. (2019). Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images. *Solar Energy*.
- EIG Global Energy. (2020). *Cerro Dominador*. Obtenido de <https://cerrodominador.com/proyectos/>
- Eternalsunspire. (2020). *The New Normal for Module Sizes*.
- F. A. Lindholm, J. G. (1979). “*Application of the superposition principle to solar-cell analysis*”.
- Fraunhofer Chile. (2021). *Fraunhofer Chile Research*. Obtenido de https://www.fraunhofer.cl/es/cset/areas_negocio/proyecto/electroluminiscencia.html

- Generadoras de Chile. (2019). <http://generadoras.cl/documentos/reportes-anuales/reporte-anual-2019>.
- Górriz, F. A. (2014). *Software de Análisis de Imágenes en Ensayos de Electroluminiscencia (EL) de Dispositivos Fotovoltaicos*.
- Hollows, G. (2005). *Vision-systems.com*. Obtenido de <https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/article/16735776/understanding-fundamentals-of-imaging-lenses>
- IBM Corporation. (2020). *IBP SPSS Statistics / ¿Qué es una red neuronal?* Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/27.0.0?topic=networks-what-is-neural-network>
- International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 60904-13*.
- International Energy Agency. (2014). *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems, Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules*.
- International Energy Agency. (2018). *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications*.
- Ministerio de Energía. (2020). *Explorador Solar*. Obtenido de <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/exploracion>
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Gobierno de Chile. (2017). *Ministerio del Interior y Seguridad Pública - Palacio de la Moneda*.
- Na8. (2018). *Aprende Machine Learning*. Obtenido de <https://www.aprendemachinelearning.com/como-funcionan-las-convolutional-neural-networks-vision-por-ordenador/>
- Nelson, J. (2002). *The Physics of Solar Cells*.
- Phan, B. (2020). *10 Minutes to Building a CNN Binary Image Classifier in TensorFlow*. Obtenido de Towards Data Science: <https://towardsdatascience.com/10-minutes-to-building-a-cnn-binary-image-classifier-in-tensorflow-4e216b2034aa>

- powerfromsunlight.com. (2017). *Power From Sunlight*. Obtenido de <https://www.powerfromsunlight.com/need-know-solar-cell-busbar-0bb-3bb-5bb/>
- Salazar-Peralta, A. (2018). Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la técnica de Electroluminiscencia. *Revista de Ingeniería Eléctrica*.
- Sauma, E. E. (2012). *Políticas de Fomento a las energías renovables no convencionales (ERNC) en Chile*.
- Sergiu Deitsch, C. B.-L. (2021). *Segmentation of photovoltaic module cells in uncalibrated electroluminescence images*. Obtenido de Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00138-021-01191-9>
- SGS Chile. (2021). *SGS Chile*. Obtenido de <https://www.sgs.cl/es-es/consumer-goods-retail/electrical-and-electronics-total-solution-services/solar-energy-technology/solar-modules/pre-qualification-testing>
- TÜV Rheinland. (2021). *TÜV Rheinland Chile*. Obtenido de <https://www.tuv.com/chile/es/m%C3%B3dulos-fotovoltaicos.html>
- Universidad de Antofagasta. (2015). *Universidad de Antofagasta - Centro de Desarrollo Energético*. Obtenido de http://www.uantof.cl/centros/desarrollo_energetico
- ZAE Bayern. (2018). *GitHub*. Obtenido de <https://github.com/zae-bayern/elpv-dataset>
- Zafra, D. (2020). *Capture The Atlas*. Obtenido de <https://capturetheatlas.com/es/ruido-en-fotografia/>

10. Anexos

10.1. Tamaños de Módulos FV en la Industria

Tabla de tamaño de módulos más grandes en la industria, que usan “wafers” de tamaño M10:

Tabla V

Module Size (no. of Full Cells)	Layout pattern	Average Module Power	Average Module Width	Average Module Length	Manufacturers with released modules
66	6 x 11	490W+	~1.13m	~2.05m	Longi
72	6 x 12	530W+	~1.13m	~2.25m	Longi Canadian Solar Jinko JA Solar Jolywood CECEP
78	6 x 13	570W+	~1.13m	~2.45m	Canadian Solar Jinko JA Solar Talesun Jolywood HT-SAAE HT Solar Group

Tabla de tamaño de módulos de película delgada (“*thin film*”) más grandes en la industria:

Tabla VI

Module Power	Module Width	Module Length	Manufacturers with released modules
450W	1.23m	2.0m	First Solar

Tabla de tamaño de módulos más grandes en la industria, que usan “wafers” de tamaño M12:

Tabla VII

Module Size (no. Cells)	Layout pattern	Average Module Power	Average Module Width	Average Module Length	Manufacturers with released modules
50	5 x 10	500W+	~1.1m	~2.2m	Risen Canadian Solar GCL-SI Seraphim LDK Solar ZNshine Solar
55	5 x 11	550W+	~1.1m	~2.4m	Trina Yingli Green Sunpower
60	6 x 10	600W+	~1.3m	~2.2m	Risen Trina Canadian Solar SunTech Jolywood DZS Solar Sunpower
66	6 x 11	660W+	~1.3m	~2.4m	Canadian Solar
72	6 x 12	720W+	~1.3m	~2.6m	

Ejemplos de los módulos más grandes lanzados al mercado:

Tabla VIII

Manufacturer	Module Model	Wafer Size used	Number of Cells	Halfcut/ Shingled/ 3rd Cut	Layout pattern	Power output	Module Size
Jinko	Tiger Pro N-type	M10 - 182mm	78	HC - Shingled	6 x 13	610	2411 x 1135
JA Solar	Deep Blue 3.0	M10 - 182mm	78	HC	6 x 13	570	2450 x 1200
Longi	Hi-Mo 5 super	M10 - 182mm	72	HC	6 x 12	540	2256 x 1133
Talesun	BISTAR PRO	M10 - 182mm	78	HC	6 x 13	590	2450 x 1200
Canadian Solar	HiKu6 (78)	M10 - 182mm	78	HC	6 x 13	590	2448 x 1135
Canadian Solar	HiKu7 (66)	M12 - 210mm	66	HC	6 x 11	655	2384 x 1303
Risen	TITAN 600W+	M12 - 210mm	60	HC	6 x 10	615	2200 x 1300
Trina Solar	Vertex	M12 - 210mm	60	HC - Shingled	6 x 10	600	2172 x 1303
Trina Solar	Vertex	M12 - 210mm	55	HC - Shingled	5 x 11	550	2384 x 1096

10.2. Código de Entrenamiento y Validación de Modelo de Aprendizaje de Máquinas para Caracterización Binaria de Celdas Fotovoltaicas

Muestra del código por bloques:

10.2.1.

```
#El siguiente modelo corresponde a un clasificador binario de imágenes...
#... usando una BBDD de celdas fotovoltaicas ensayadas por Electroluminiscencia

#Librería del sistema operativo, que brinda acceso al sistema de archivos
import os
# Y la librería que permite descomprimir archivos
import zipfile
```

10.2.2.

```
#Importación de paquetes
from keras.models import Sequential
from keras.layers.normalization import BatchNormalization
from keras.layers.convolutional import Conv2D
from keras.utils.np_utils import to_categorical
from keras.layers.convolutional import MaxPooling2D
from keras.layers.core import Activation
from keras.layers.core import Dropout
from keras.layers.core import Dense
from keras.layers import Flatten
from keras.layers import Input, GlobalAveragePooling2D
from keras.models import Model
from keras.layers.core import Dense
from keras.optimizers import Adam
from keras.layers import concatenate
from keras.models import load_model
from keras import applications
```

10.2.3.

```
#La data de entrenamiento es extraída al directorio /Celdas_FV_EL/train
#Este directorio a su vez contiene 2 subdirectorios de celdas con y sin cracking

#Crear variable Directorio para imágenes de entrenamiento - celdas con cracking
train_cracking_dir = os.path.join('[Directorio]/n_train/cracking/')

#Crear variable Directorio para imágenes de entrenamiento - celdas sin cracking
train_nocracking_dir = os.path.join('[Directorio]/n_train/no_cracking/')

#Crear variable Directorio para imágenes de validación - celdas con cracking
valid_cracking_dir = os.path.join('[Directorio]/n_valid/cracking/')

#Crear variable Directorio para imágenes de validación - celdas sin cracking
valid_nocracking_dir = os.path.join('[Directorio]/n_valid/no_cracking/')
```

10.2.4.

```
#Verificación: Listas de archivos para cada carpeta

train_cracking_names = os.listdir(train_cracking_dir)
print(train_cracking_names[:10])

train_nocracking_names = os.listdir(train_nocracking_dir)
print(train_nocracking_names[:10])

validation_cracking_hames = os.listdir(valid_cracking_dir)
print(validation_cracking_hames[:10])

validation_nocracking_names = os.listdir(valid_nocracking_dir)
print(validation_nocracking_names[:10])
```

10.2.5.

```
#Display de volumen de data: Número total de imágenes de celadas con y sin cracking en cada directorio

print('total de imágenes de entrenamiento con cracking:', len(os.listdir(train_cracking_dir)))
print('total de imágenes de entrenamiento sin cracking:', len(os.listdir(train_nocracking_dir)))
print('total de imágenes de validación con cracking:', len(os.listdir(valid_cracking_dir)))
print('total de imágenes de validación sin cracking:', len(os.listdir(valid_nocracking_dir)))
```

10.2.6.

```
#Ahora se busca visualizar las imágenes
#El primer paso es configurar los parámetros de matplotlib

#Backend de matplotlib en línea
%matplotlib inline

#Importar funciones para personalizar la visualización de lo que desea "graficar"
import matplotlib.pyplot as plt
#Importar funciones para cargar, reescalar y visualizar imágenes
import matplotlib.image as mpimg

#Variables para establecer configuración del display
nrows = 4
ncols = 4

#Índice de iteración sobre imágenes
pic_index = 0
```

10.2.7.

```
# Display de 8 celdas con cracking, seguidas de 8 celdas sin cracking

fig = plt.gcf()
fig.set_size_inches(ncols * 4, nrows * 4)

pic_index += 8
next_dandelion_pic = [os.path.join(train_cracking_dir, fname)
                      for fname in train_cracking_names[pic_index-8:pic_index]]
next_grass_pic = [os.path.join(train_nocracking_dir, fname)
                  for fname in train_nocracking_names[pic_index-8:pic_index]]

for i, img_path in enumerate(next_dandelion_pic + next_grass_pic):
    # Set up de cada subplot
    sp = plt.subplot(nrows, ncols, i + 1)
    #No mostrar ejes
    sp.axis('Off')

#Cambio de canal de color
img = mpimg.imread(img_path,-1)
plt.imshow(img,cmap='gray')

plt.show()
```

10.2.8.

```
from tensorflow.keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator

#Todas las imágenes serán reescaladas a 1/255
train_datagen = ImageDataGenerator(rescale=1/255)
validation_datagen = ImageDataGenerator(rescale=1/255)

#Imágenes de entrenamiento en batches de 120 celdas, usando el generador train_datagen
train_generator = train_datagen.flow_from_directory(
    #Directorio origen para entrenamiento de imágenes
    '[Directorio]/n_train/',
    classes = ['cracking', 'no_cracking'],
    color_mode='grayscale',
    #Todas las imágenes son reescaladas a resolución 200x200
    target_size=(200, 200),
    batch_size=120,
    #Etiquetado binario
    class_mode='binary')

#Validación de imágenes en batches de 19 celdas usando el generador valid_datagen
validation_generator = validation_datagen.flow_from_directory(
    '[Directorio]/n_valid/', # This is the source directory for training images
    classes = ['cracking', 'no_cracking'],
    color_mode='grayscale',
    #Todas las imágenes son reescaladas a resolución 200x200
    target_size=(200, 200),
    batch_size=19,
    #Etiquetado binario
    class_mode='binary',
    shuffle=False)
```

10.2.9.

```
#Importación de librerías y paquetes
import tensorflow as tf
import numpy as np
from itertools import cycle

from sklearn import svm, datasets
from sklearn.metrics import roc_curve, auc
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import label_binarize
from sklearn.multiclass import OneVsRestClassifier
from scipy import interp
from sklearn.metrics import roc_auc_score
```

10.2.10.

```
#Definición del modelo de Redes Neuronales Convolucionales
def define_model():
    #model = Sequential()
    #model.add(Conv2D(32, (3, 3), activation='relu', kernel_initializer='he_uniform', padding='same', input_shape=(200, 200, 1)))
    #model.add(MaxPooling2D((2, 2)))
    #model.add(Conv2D(64, (3, 3), activation='relu', kernel_initializer='he_uniform', padding='same'))
    #model.add(MaxPooling2D((2, 2)))
    #model.add(Flatten())
    #model.add(Dense(128, activation='relu', kernel_initializer='he_uniform'))
    #model.add(Dense(1, activation='sigmoid'))
    #Compilar modelo
    #opt = 'adam'
    #model.compile(optimizer=opt, loss='binary_crossentropy', metrics=['accuracy'])
    return model
```

10.2.11.

```
model = tf.keras.models.Sequential([tf.keras.layers.Flatten(input_shape = (200,200,1)),
                                    tf.keras.layers.Dense(128, activation=tf.nn.relu),
                                    tf.keras.layers.Dense(1, activation=tf.nn.sigmoid)])

ensayo = define_model()
ensayo.summary()
```

10.2.12.

```
model.compile(optimizer = 'adam',  
              loss = 'binary_crossentropy',  
              metrics=['accuracy'])
```

10.2.13.

```
#Ejecución entrenamiento + validación (definición de número de Epochs)  
history = ensayo.fit(train_generator,validation_data=validation_generator,epochs=20)
```

10.2.14.

```
#Precisión del modelo  
  
a,b = ensayo.evaluate(validation_generator)  
acc = str(round(b*100))  
  
print ('La precisión del modelo es ' + acc + '%')  
  
#Resultados de precisión según número de Epochs  
#10 Epochs: 67,81%  
#15 Epochs: 66,56%  
#20 Epochs: 74,84%  
#25 Epochs: 66,72%  
#30 Epochs: 70,31%  
#35 Epochs: 66,72%  
#40 Epochs: 67,66%  
#45 Epochs: 66,87%  
#50 Epochs: 68,28%
```

10.2.15.

```
#Guardar modelo entrenado  
ensayo.save('Modelo_Entrenado/ensayo.h5')
```

10.3. Código de Ampliación de Volumen de Data para Imágenes de Celdas FV ensayadas por EL

Muestra del código por bloques:

10.3.1.

```
#Importación de Librerías  
  
import pandas as pd  
import matplotlib.pyplot as plt  
import random  
import cv2  
import os
```

10.3.2.

```
#Se debe tener dividida en carpetas la data de entrenamiento "train" y de validación "valid"
#Ingresar Directorio hasta donde se encuentran ambas carpetas para crear variables de Directorio para carpetas de data inicial
directorio_t = '[Directorio]/train/'
directorio_v = '[Directorio]/valid/'

#Variables de condición de directorio para separar la data ampliada en nuevas carpetas de entrenamiento y validación
crack = 'cracking/'
no_crack = 'no_cracking/'

#
nuevo_train = '[Directorio]/n_train/'
nuevo_valid = '[Directorio]/n_valid/'
```

10.3.3.

```
#Función de aumentado de datos para archivos
def aumentar(direct,nuevo_direct,condicion):

    n_h = '_h.png'
    n_v = '_v.png'
    n_hv= '_hv.png'

    celdas = []
    for r, d, f in os.walk(direct+condicion):
        for file in f:
            celdas.append(os.path.join(file))

    for foto in celdas:
        imagen = cv2.imread(direct+condicion+foto,1)
        #Voltear respecto a eje x
        flip_h = cv2.flip(imagen,0)
        #Voltear respecto a eje y
        flip_v = cv2.flip(imagen,1)
        #Voltear respecto a ambos ejes
        flip_hv= cv2.flip(imagen,-1)

        destino = nuevo_direct+condicion+foto[:-4]+n_h

        cv2.imwrite(nuevo_direct+condicion+foto,imagen)
        cv2.imwrite(nuevo_direct+condicion+foto[:-4]+n_h,flip_h)
        cv2.imwrite(nuevo_direct+condicion+foto[:-4]+n_v,flip_v)
        cv2.imwrite(nuevo_direct+condicion+foto[:-4]+n_hv,flip_hv)

    return destino
```

10.3.4.

```
#Aplicación de la función para entrenamiento y validación y sus respectivas subcarpetas de cracking y no cracking
train_crack = aumentar(directorio_t,nuevo_train,crack)
train_no_crack = aumentar(directorio_t,nuevo_train,no_crack)
valid_crack = aumentar(directorio_v,nuevo_valid,crack)
valid_no_crack = aumentar(directorio_v,nuevo_valid,no_crack)
```

10.4. Código de Metodología de Procesamiento y Análisis Cualitativo para Imágenes de EL en módulos FV

Muestra del código por bloques:

10.4.1.

```
#Importación Librerías
import cv2
import glob
import numpy as np
import datetime
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
```

10.4.2.

```
#Importación Librerías
from tensorflow.keras.models import load_model
from tensorflow.keras.preprocessing import image
```

10.4.3.

```
#Función para uso de clicks en pantalla emergente
def draw_circle(event,x,y,flags,param):
    global puntos
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        cv2.circle(imagen_revision,(x,y),5,(255,0,0),-1)
        revision_x=x
        revision_y=y
        puntos.append([revision_x,revision_y])

#Función de aplicación de identificación de puntos y normalización de imagen (generación de región de interés, ROI)
def generar_ROI(imagen,nc,nf):
    global imagen_revision,puntos

    imagen_revision=imagen.copy()

    for i in range (0,4):
        print("Marcar puntos")
        puntos=[]

        cv2.namedWindow('Generar ROI')
        cv2.setMouseCallback('Generar ROI',draw_circle)
```

```
puntos_actual=len(puntos)
while len(puntos)!=4:
    cv2.imshow("Generar ROI",imagen_revision)
    cv2.waitKey(1)
    if puntos_actual!=(len(puntos)):
        if len(puntos)==1:
            print("Puntos guardados: 1")
            puntos_actual=1
        elif len(puntos)==2:
            print("Puntos guardados: 2")
            puntos_actual=2
        elif len(puntos)==3:
            print("Puntos guardados: 3")
            puntos_actual=3
        elif len(puntos)==4:
            print("Puntos guardados: 4")
            puntos_actual=4
            print("Todos los puntos marcados.")
            cv2.circle(imagen_revision,(puntos[3][0],puntos[3][1]),5,(255,0,0),-1)
            cv2.imshow("Generar ROI",imagen_revision)
            cv2.waitKey(1)
```

```

if len(puntos)==4:
    #cuando se terminan los puntos
    opcion=input("Desea guardar los puntos (Si [1], No [2]): ")
    #Al confirmar
    if opcion=="1":
        #Iniciar proceso de generacion y display de ROI
        print("Mostrando ROI")

        points_ROI = np.float32(puntos)
        print(points_ROI)
        new_points_ROI = np.float32([[0,0],[200*nc,0],[0,200*nf],[200*nc,200*nf]])

        M_transformacion = cv2.getPerspectiveTransform(points_ROI,new_points_ROI)
        imagen_a_analizar_ROI = cv2.warpPerspective(imagen,M_transformacion,(200*nc,200*nf))

        return imagen_a_analizar_ROI

    #No guardar puntos, marcar de nuevo
    elif opcion=="2":
        puntos.clear()
        imagen_revision=imagen.copy()
        cv2.imshow("Generar ROI",imagen_revision)
        print("Reiniciando captura de puntos")
        generar_ROI(imagen,nc,nf)

```

10.4.4.

```

#INPUT USUARIO

#Nombre de archivo de la imagen por analizar (incluyendo la ruta desde la ubicación del notebook)
archivo = '[Nombre archivo, incluir directorio si no está en la misma carpeta que el notebook]'

#Identificador del módulo
id_modulo = 'm1'

#Configuración de celdas en el módulo
fil_celdas = 2
col_celdas = 2

```

10.4.5.

```

#AJUSTES DE ESCALADO + NORMALIZACIÓN

#Cargar imagen dentro de la libreria
imagen = cv2.imread(archivo,0)

#En caso de que la imagen original sea muy grande, con este parametro se puede achicar para mostrarse mejor
escala = 5

#Parámetros de escalado
largo = int(np.round(imagen.shape[0]/escala))
ancho = int(np.round(imagen.shape[1]/escala))

#Imagen redimensionada para mostrarse
img = cv2.resize(imagen,(largo,ancho))

#Imagen con corrección de perspectiva, los argumentos son: imagen a analizar, numero de columnas y numero de filas
corregida = generar_ROI(img,col_celdas,fil_celdas)

#ORDEN SELECCIÓN PUNTOS: 1.ArribaIzq - 2.ArribaDer - 3.AbajoIzq- 4.AbajoDer

```

10.4.6.

```

#Ver imagen original
plt.matshow(img,cmap='gray')

```

10.4.7.

```

#Ver imagen corregida
plt.matshow(corregida,cmap='gray')

```

10.4.8.

```
#Cargar modelo
modelo = load_model('ensayo.h5')
```

10.4.9.

```
#plt.matshow(corregida[100:200,0:100]) #Segunda celda
#plt.matshow(corregida[0:100,100:200]) #Tercera celda
#plt.matshow(corregida[100:200,100:200]) #Cuarta celda

diag_m = 'NO'
cont_c_cracking = 0

#Generación dataset de celdas del módulo + Caracterización celdas
for f in range(0,fil_celdas):
    for c in range(0,col_celdas):
        a = corregida[200*f:200*(f+1),200*c:200*(c+1)]
        x = image.img_to_array(a)
        x = np.expand_dims(x,axis=0)

        #Guarda celda con id asignado "ID panel + ID fila + ID columna"
        cv2.imwrite('[Directorio]/Output_Algoritmo/'+id_modulo+'-i'+str(f)+'j'+str(c)+'.jpg',a)

        #Aplicación del modelo de ML
        prediccion = modelo.predict(x)

        if prediccion[0]<0.5:
            diag_a = 'presenta cracking'
            diag_m = 'SI'
            cont_c_cracking = cont_c_cracking + 1
        else:
            diag_a = 'no presenta cracking'
        #print(prediccion)
        print('La celda '+id_modulo+'-i'+str(f)+'j'+str(c),diag_a)
```

10.4.10.

```
#Diagnóstico de módulo
print('El módulo '+id_modulo+' '+diag_m+' presenta cracking, se identificó cracking en '+str(cont_c_cracking)+' celdas')
```

10.5. Formato Reporte según IEC 60904-13: 2018 (extracto):

IEC TS 60904-13:2018 © IEC 2018

– 23 –

- a) a title;
- b) name and address of the test laboratory and location where the tests were carried out;
- c) unique identification of report and of each page;
- d) name and address of client, where appropriate;
- e) description, characterization, condition, and identification of the item tested;
- f) date of receipt of test item and date(s) of test, where appropriate;
- g) identification of measurement equipment used, including camera, detector, and lens and type;
- h) information, either by referencing the appropriate clauses of this document, or additional information as needed, describing the applied image corrections, including but not limited to handling of single time events, stuck pixels, and background removal, enhancement with filters or other manipulations of the raw image file;
- i) reference to sampling procedure, where relevant;
- j) determined sharpness and sharpness class, SNR_{50} and SNR class, and corresponding application category for the imaging conditions and if evaluated specifically for the module imaged or the REF module;
- k) exposure time, WD, gain (or ISO speed setting), f -number of aperture;
- l) any deviations from, additions to or exclusions from the test method, and any other information relevant to the specific test, such as environmental conditions;
- m) images (pre- and post-processed, as applicable) obtained during the examinations and derived results supported by tables, graphs, histogram data, sketches as appropriate showing module orientation when mounted in arrays (Figure 9 shows a scheme for referencing particular cells in movable modules);
- n) current and voltage (if measured) applied on the module under test, module temperature, camera settings, working distance, imaging angle (degrees from normal), and nominal ambient light conditions;

(a)

1,A	1,B	1,C	1,J
2,A	2,B	2,C	2,J
3,A	3,B	3,C	3,J
4,A	4,B	4,C	4,J
5,A	5,B	5,C	5,J
6,A	6,B	6,C	6,J
7,A	7,B	7,C	7,J
1,A	1,B	1,C	1,J

(b)

1,J	2,J	3,J	4,J	5,J	6,J	7,J	1,J
1,C	2,C	3,C	4,C	5,C	6,C	7,C	1,C
1,B	2,B	3,B	4,B	5,B	6,B	7,B	1,B
1,A	2,A	3,A	4,A	5,A	6,A	7,A	1,A

The default position, when the module is movable shall be the junction box (or if no junction box, the positive connector) on the left or top (typically on the backside of the module).

Figure 9 – Scheme for labeling position of cells in a module viewed from the light-facing side according to coordinates (i,j) in portrait orientation (a) or rotated into landscape orientation (b), which shall be indicated if applicable

- o) any failure, with position in module and type of defect;
- p) a statement of the estimated uncertainty of the test results, including SNR information (where relevant);
- q) a signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of, and the date of the report;
- r) where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the items tested;
- s) where relevant, a statement that the report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

