

Tipo de Documento : **Procedimiento**
Nombre del Documento : **Procedimiento de pruebas para pruebas de electroluminiscencia en módulos fotovoltaicos**
Fecha : 04 de octubre de 2022
Autores : Dr. Edward Fuentealba, Dr. Jorge Rabanal-Arabach, Ing. Javier Astudillo
Coautores :



CDEA
CENTRO DESARROLLO
ENERGÉTICO ANTOFAGASTA
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA



Nivel de diseminación		
PU	Público	
PP	Restringido a los autores y a personal de CDEA	
RE	Restringido a un grupo específico de personas definido por coautores	
CO	Confidencial (únicamente a un grupo de personas definido por los autores)	X

Historia			
Versión	Autor	Modificación	Fecha
1	Javier Astudillo	Creación	01/12/2021
2	Edward Fuentealba	Integración de contenido	01/02/2022
3	Javier Astudillo	Modificación de contenido	28/04/2022
4	Jorge Rabanal-Arabach	Modificación de contenido	07/05/2022
5	Javier Astudillo	Modificación de contenido	23/08/2022
6	Jorge Rabanal-Arabach	Modificación de contenido	04/10/2022

Aprobación		
Fecha	Nombre	V.B
01/02/2022	Edward Fuentealba V.	O.K
07/05/2022	Jorge Rabanal-Arabach	OK
25/08/2022	Jorge Rabanal-Arabach	OK

DECLARACION DE DERECHOS DE PROPIEDAD

Este documento contiene información, que es propiedad del CDEA. Este documento ni la información contenida en este documento se utilizarán, duplicarán ni comunicarán por ningún medio a un tercero, en su totalidad o en partes, excepto con el consentimiento previo por escrito del CDEA.

TABLA DE CONTENIDO

1	DEFINICIONES	2
2	DESCRIPCIÓN	4
2.1	Equipos y materiales a ser empleados.....	6
3	PROCEDIMIENTO.....	8
3.1	Preparación y configuración de los equipos	9
3.2	Fotografía de EL.....	13
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	20
5	RECOMENDACIONES.....	22
6	BIBLIOGRAFÍA.....	23
7	ANEXOS.....	24
7.1	Grietas de las celdas vistas en EL	24
7.2	Ejemplos de Fallas encontradas mediante EL	32
7.3	Planilla de procedimiento: Ensayo de EL	37

1 DEFINICIONES

Absortividad	: Fracción de la radiación incidente que es absorbida, en determinado rango de frecuencias, para una temperatura dada.
Barra de Soporte / Support bars	: Barras de soporte de aluminio anodizado transversales para dar soporte a la estructura del MFV. Usualmente empleadas en MFV de gran área o en algunos que reemplazan el vidrio frontal por polímeros o usan vidrios de espesor inferior a 2 mm.
Cable / Cable	: Cable solar de conexión entre la caja de conexión (junction box) y el conector (MC4) que conecta eléctricamente los módulos. Su longitud estándar es de 1.2 m (uno para el terminal positivo y otro para el terminal negativo). Usualmente, el calibre es de 4 mm ² de espesor, pero depende de la corriente del MFV.
Caja de empalme / Juntion Box	: Caja de conexiones donde se conectan los string de celdas a los cables externos. En ellas se encuentran los diodos de bypass (normalmente 3) para la protección del módulo. Su protección es IP67.
Celda / Cell	: Sección unitaria de conversión de energía del MFV. Un MFV está habitualmente compuesto de 60, 72, 144 o más celdas.
Conectores / Connectors	: Conector que se ubica en el extremo del cable para interconectar los MFV. Su nomenclatura estandarizada es MC4 o nombre de fantasía según fabricante. Definido para operar en 1000/1500 V, 30 A, IP68 y acorde a la sección cruzada del cable.
DC	: Corriente directa / continua, del inglés <i>Direct Current</i> .
DUT	: Dispositivo bajo prueba, del inglés <i>Device Under Test</i> .

Emisividad	: Intensidad de la radiación emitida por un cuerpo, en determinado rango de frecuencias, para una temperatura dada.
Marco / Frame	: Estructura metálica de los MFV. Construido de aluminio anodizado para la protección mecánica del módulo. En el mercado se dispone de MFV sin marco metálico (“frameless”), empleado en algunas tecnologías vidrio/vidrio.
MFV / PVM	: Módulo Fotovoltaico. Dispositivo de conversión de energía que transforma la luz solar en energía eléctrica de corriente directa.
Parte trasera / Backsheet	: Cara trasera del módulo fabricada usualmente apilando varios polímeros y revestimientos. En módulos monofaciales puede ser de color blanco. En módulos bifaciales puede ser un polímero transparente o un vidrio templado.
PID	: Degradación inducida por potencial eléctrico, del inglés <i>Potential Induced Degradation</i> . Corresponde a una degradación electroquímica de la celda solar causada por la polarización eléctrica a la que está sometida. Usualmente aparece en sistemas que operan a tensión eléctrica superior a 800 V.
SNR	: Relación señal/ruido, del inglés <i>Signal-to-Noise Ratio</i> .
Vidrio / Glass	: Vidrio templado que brinda estabilidad mecánica al MFV y protección a las celdas. Tiene usualmente un espesor de 2 a 4 mm. El vidrio puede incorporar o no capas antirreflejo (ARC) y/o antipolvo (ASC).

2 DESCRIPCIÓN

El procedimiento, a grandes rasgos, corresponde a excitar eléctricamente a un módulo fotovoltaico, utilizando una fuente externa de DC, y fotografiarlo utilizando una cámara infrarroja, todo esto en una habitación completamente oscura para evitar el ruido ambiente y poder captar la luminosidad proveniente del módulo fotovoltaico con una SNR lo más alta posible.

Los módulos fotovoltaicos por probar deben haber aprobado previamente una inspección visual, prueba de aislación, termografía y medición de curva I-V. Adicionalmente, ambos cables del módulo deben estar en buen estado y contar con sus respectivos conectores MC4. Cabe destacar que este procedimiento está diseñado específicamente para módulos basados en tecnologías del silicio, tanto monofaciales como bifaciales.

Este procedimiento de prueba se basa en los lineamientos establecidos en el estándar IEC 60904-13, en el cual se recomienda que:

- Se elija un sensor (de la cámara) adecuado para la tecnología fotovoltaica a la cual se desea estudiar mediante electroluminiscencia. Esto debido a que los diferentes materiales responden con luminiscencia a diferentes longitudes de onda. Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 2.1.

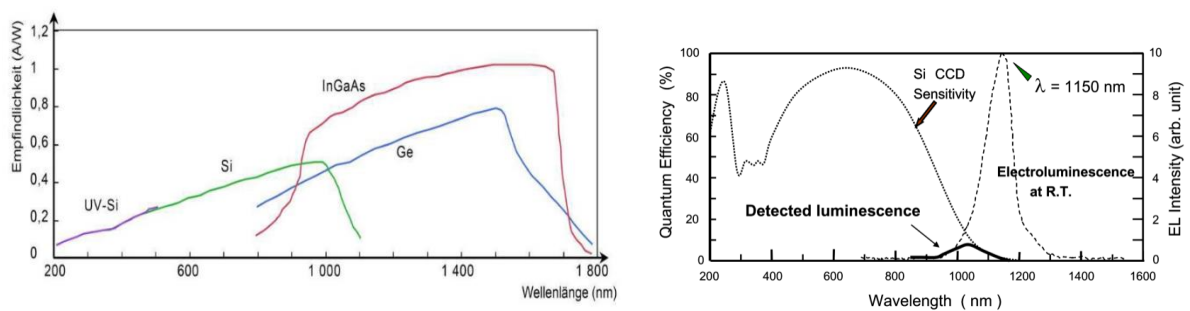


Figura 2.1. Respuesta espectral de sensores fabricados con diferentes materiales semiconductores [1, 2].

- El lente de la cámara no debe tener ningún filtro o película que remueva los infrarrojos con una longitud de onda cercana a aquellas emitidas por el semiconductor bajo estudio.

- El lente puede tener cualquier distancia focal, sin embargo, debido a que los lentes de gran angular generalmente distorsionan las imágenes es recomendado ocupar lentes con distancias focales mayores.
- Mayores aperturas permiten obtener imágenes de electroluminiscencia de mejor calidad, sin embargo, lentes de mala calidad pueden introducir difracción de la luz y otras aberraciones ópticas, además, los lentes de gran angular suelen introducir un viñeteado considerable al ocuparlos con grandes aperturas.
- Se pueden utilizar filtros para excluir otras longitudes de onda, en el caso de módulos basados en el silicio, son útiles los filtros pasa-largo de 950 nm para mejorar la SNR. Estos filtros van acoplados al lente objetivo de la cámara.
- Es preferible utilizar una habitación oscura, esto permite obtener imágenes de mayor calidad. Se debe cuidar de bloquear completamente cualquier luz exterior. Si se ocupan filtros en la cámara, es posible utilizar iluminación LED que emita luz en la longitud de onda bloqueada por el filtro. Para mediciones en exteriores, se debe intentar minimizar la luz externa lo máximo posible (ej.: hacer las mediciones de noche). Si hay otras fuentes de luz presentes al momento de realizar la EL, se hace necesario el uso de técnicas de substracción en las imágenes. Esto se hace necesario cuando se realiza EL en exteriores, donde no es posible evitar que el MFV sea iluminado por el sol.
- Para mediciones en laboratorio, la temperatura del módulo debe de ser de entre 24 °C y 26 °C, medida por un sensor ubicado en la parte posterior del módulo con una precisión de $\pm 1^\circ$ C, esto para tener consistencia al momento de realizar comparaciones cualitativas y cuantitativas. La temperatura final del módulo, medida 15 s luego de la toma de la imagen, debe de ser anotada. En el caso de que la temperatura del módulo esté fuera del rango al momento de la toma de imágenes, ya sea por imposibilidad de mantenerlo dentro o por estudios de efectos de temperatura, se debe dejar constancia de esta situación.
- La fuente de poder debe de ser capaz de suministrar voltaje y corriente de al menos los valores de V_{OC} e I_{SC} del módulo bajo estudio.

Las condiciones ambientales necesarias para realizar la prueba son:

- Nivel de iluminación menor a 0.25 lux (todas las fuentes de luz apagadas).
- Temperatura ambiente de 25 °C.

2.1 Equipos y materiales a ser empleados

En la Tabla 2.1, se listan los materiales necesarios para la realización de esta prueba.

La fuente de poder debe entregar una tensión de al menos 10% de la tensión V_{MPP} y amplitud de corriente similar a la I_{SC} el MFV bajo prueba, siendo ambos regulables, lo cual permitirá realizar la prueba en diversos tipos de módulos. Para el caso de MFV tipo c-Si, valores de 80 V y 20 A respectivamente son suficientes.

En cuanto al soporte para el módulo, este debe ser capaz de sostener al módulo en una posición vertical, de manera tal que la cámara pueda apuntar de manera perpendicular a la cara frontal del módulo.

En caso de usar un laboratorio con condiciones controladas, se recomienda contar con una computadora con el software de control “DigiCamControl” instalado, esto para poder tomar las fotos de manera remota.

Tabla 2.1. Materiales requeridos.

N°	Nombre	Requisitos/Comentarios	Cantidad
1	Bastidor para sujeción del módulo	Debe sujetar al módulo de manera firme y perpendicular al suelo.	1
2	Paño de limpieza	Microfibra o similar.	1
3	Agua desmineralizada	Cantidad suficiente para limpiar adecuadamente la cara frontal y trasera del módulo, y los sensores.	1
4	Cámara DSLR (con filtro infrarrojo)	Debe ser capaz de captar radiación infrarroja entre los rangos de 1 000 nm a 1 200 nm. Resolución de al menos 24 MPx	1
5	Trípode	Compatible con la cámara, idealmente debe permitir a la cámara estar a una altura de entre 1 m y 1.2 m.	1
6	Cable de conexión USB	Para conectar la cámara al computador, debe de ser un largo suficiente como para conectar a ambos y no quedar tirante. Si el cable excede 5 m, entonces se debe incorporar un extensor de rango.	1
7	Fuente de alimentación DC	Debe entregar 80 V y 20 A, siendo ambos regulables.	1
8	Aire acondicionado	Debe tener la capacidad de mantener la temperatura de la habitación en el rango de 20 °C a 25 °C.	1
9	Computadora con software de control	Computadora básica, con el software de control previamente instalado. (Se recomienda DigiCamControl)	1
10	Planilla de procedimiento	Adjunta en el anexo 7.3 del procedimiento	1

3 PROCEDIMIENTO

Los procesos de toma de imágenes y análisis de resultados se encuentran ilustrados en dos diagramas de flujo, uno para cada parte del procedimiento, los cuales se muestran en la Figura 3.1 y Figura 3.2, respectivamente.

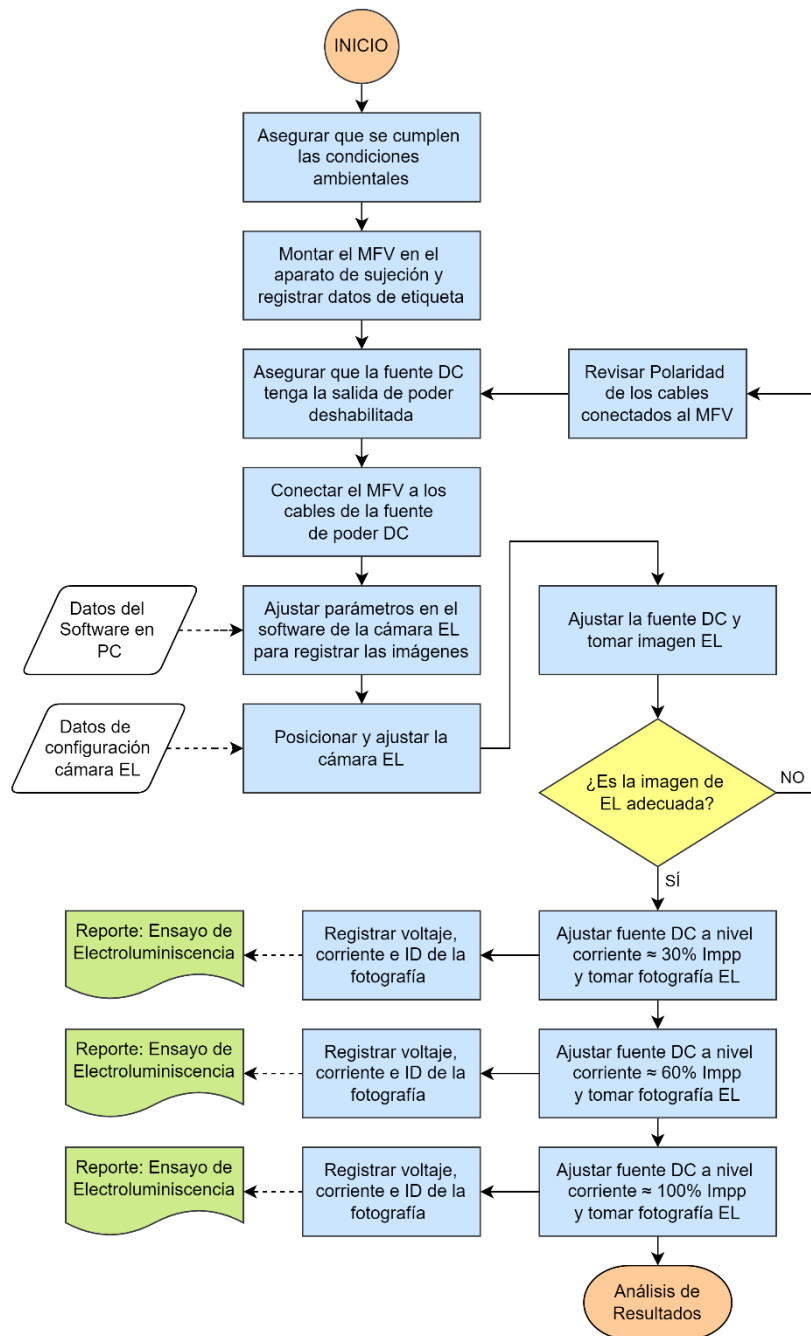


Figura 3.1. Diagrama de flujo para la toma de imágenes de electroluminiscencia.

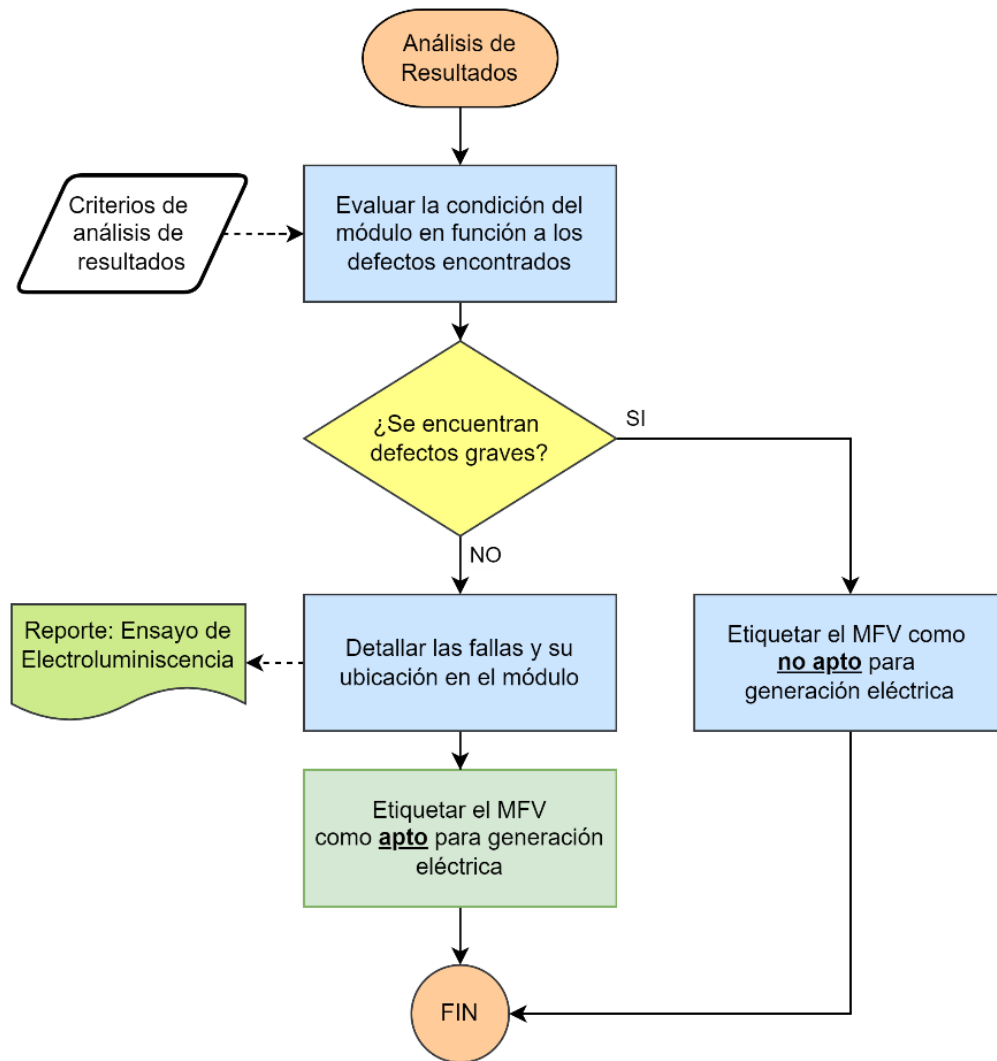


Figura 3.2. Diagrama de flujo de la evaluación de resultados.

3.1 Preparación y configuración de los equipos

Los siguientes pasos se basan en la captura de imágenes EL en laboratorio.

En primer lugar, se debe de encender el aire acondicionado configurándolo para que opere con una temperatura de 18 °C. Se debe tener cuidado de apagar el display LED del equipo, en caso contrario la luminosidad emitida por este podría afectar de manera negativa las imágenes de EL. Ejemplo de esto se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Aire acondicionado con el display de temperatura encendido/apagado.

Posteriormente, se debe encender el computador y conectar la cámara a este mediante el cable de conexión USB (ver Figura 3.4 y Figura 3.5).



Figura 3.4. Cable conectado a la cámara.



Figura 3.5. Computador conectado a la cámara.

Abrir el software de control “DigiCamControl” y configurar los siguientes ajustes:

- Apertura: 4.5
- Exposición: 30 s
- ISO: 200.
- Ajuste de compensación de exposición: 0
- Balance de blancos: Automático
- Compresión: JPEG (FINE)
- Tipo de imagen: Monocromática

Un ejemplo se muestra en la Figura 3.6.

Estos ajustes son recomendados y pueden ser usados como punto de partida, pero valores como apertura, tiempo de exposición y velocidad ISO podrían ser ajustados acorde a la tecnología del módulo bajo inspección. Para estos efectos se recomienda tener un módulo de calibración, sin fallas, de la misma tecnología del grupo de MFV a inspeccionar.

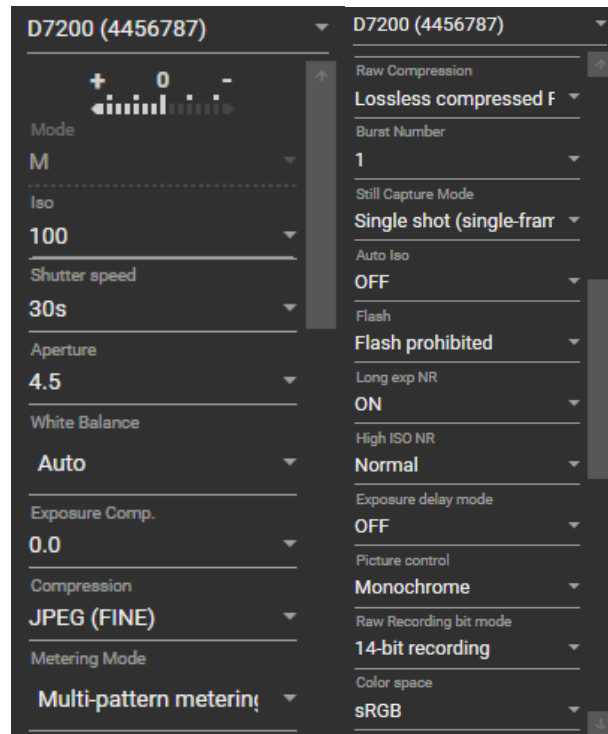


Figura 3.6. Ejemplo de la configuración de la cámara en el programa DigiCamControl.

A continuación, encender la fuente de DC con el interruptor primario, ajustar el voltaje a 0 y el límite de corriente a la I_{mpp} del módulo.

En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de fuente de poder (Keysight N8941A). En el círculo rojo, el interruptor principal de la fuente el cual enciende al equipo sin entregar energía en la salida. En el círculo amarillo, los botones de ajuste de corriente y voltaje, los cuales junto con el teclado numérico ubicado al costado permiten fijar los límites de corriente y voltaje que entrega la fuente.



Figura 3.7. Fuente de DC Keysight N8941A.

3.2 Fotografía de EL

Los siguientes pasos se basan en la captura de imágenes EL en laboratorio.

1. Limpiar la cara frontal del panel en caso de ser necesario



Figura 3.8. Módulo limpio

2. Montar el módulo en el soporte (bastidor)
 - A. El módulo descansa sobre un riel en la parte inferior del bastidor.



Figura 3.9. Riel de apoyo

- B. A cada lado del bastidor hay un mecanismo para retener al módulo y mantenerlo fijo en posición vertical. Estos se ajustan de manera similar a un tornillo de banco.

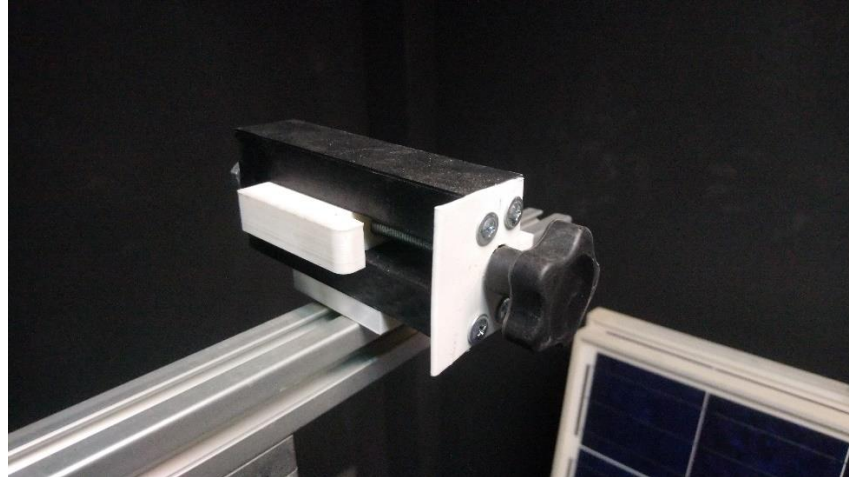


Figura 3.10. Mecanismo de sujeción

- C. Módulo instalado de manera correcta



Figura 3.11. Módulo instalado de manera correcta

3. Registrar los datos de la etiqueta del módulo
4. Conectar el módulo a la fuente de alimentación.
Procurar que la fuente DC tenga su salida de poder deshabilitada.

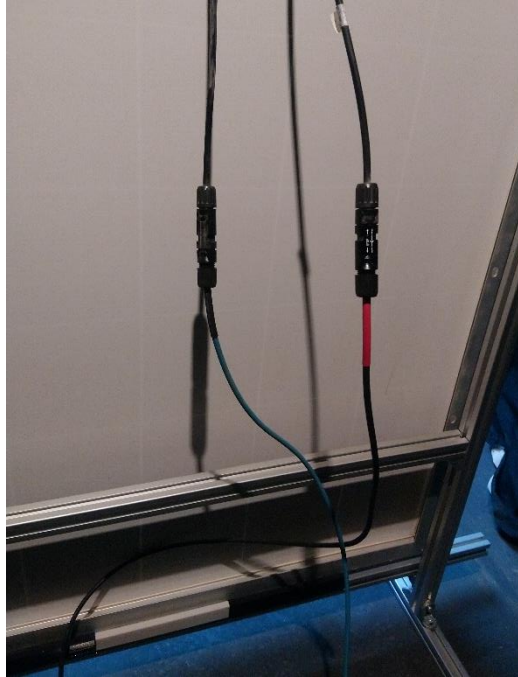


Figura 3.12. Fuente conectada a los terminales del módulo con conectores MC4.

El cable azul corresponde al terminal negativo (-), mientras que el cable negro corresponde al terminal positivo (+).

5. Configurar el software para definir el directorio en donde serán guardadas las imágenes y el nombre que tendrán estas.
6. Posicionar y ajustar la cámara
 - Instalar la cámara (sobre el trípode) frente al módulo a unos 2 m e inclinarla 90 grados hacia la derecha, así se aprovecha el área de la imagen.
 - Revisar la inclinación horizontal de la cámara, procurando que el MFV quede lo más perpendicular posible a la cámara para disminuir la distorsión de perspectiva en las fotos.
 - Ajustar el *zoom* óptico, con el anillo de zoom ubicado en el lente, de manera de que el módulo se vea completo y haya un pequeño margen entre el borde de las celdas y los límites de la imagen

- Ajustar el enfoque, con el anillo de enfoque ubicado en el lente, de manera que las *busbars* de las celdas se vean de manera definida.



Figura 3.13. Cámara ubicada frente al módulo, en la posición adecuada

7. Apagar las luces del área de prueba y cerrar la cortina completamente



Figura 3.14. Área de pruebas en oscuro

Las cortinas cuentan con un velcro para sujetarlas contra la pared y asegurarse de que no se filtre luz desde el exterior

8. Ajustar los niveles de voltaje hasta alcanzar una corriente igual o similar al de I_{MPP} del módulo.



Figura 3.15. Fuente de DC en operación.

En el círculo amarillo se muestra el interruptor secundario, el cual permite energizar / desenergizar los terminales de salida de la fuente sin tener que encender o apagar el equipo completo.

En el círculo rojo, parte del display donde se indican los límites actuales de voltaje y corriente configurados.

9. Activar la salida de la fuente DC.

10. Con el computador, tomar una fotografía de manera remota.

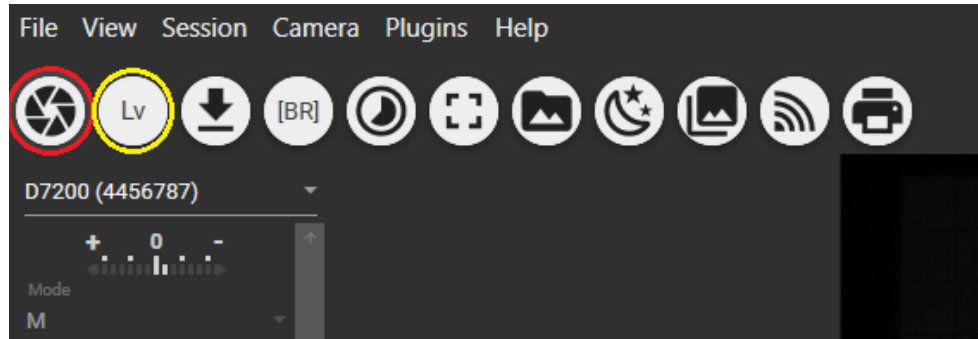


Figura 3.16. Panel de control del programa DigiCamView

En el círculo rojo, botón para tomar una fotografía

En el círculo amarillo, botón *Live View*, el cual permite observar en tiempo real lo que captura la cámara.

Cabe destacar que, debido a un bug del programa DigiCamControl, se debe alternar entre el menú principal y el modo “Live View” entre cada foto consecutiva que se desee tomar.

11. Esperar a que el computador reciba la imagen.

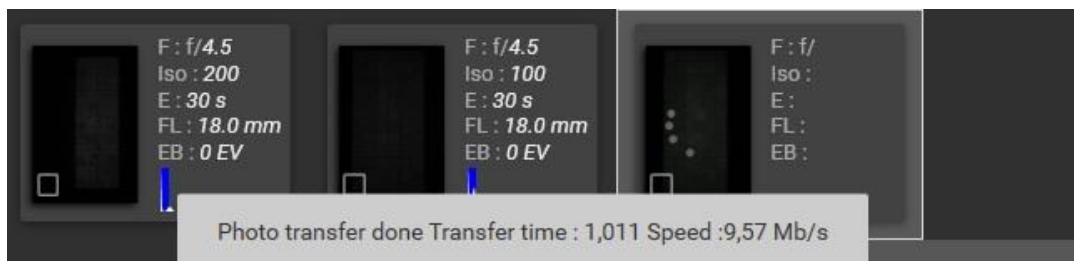


Figura 3.17. Aviso de fotografía recibida exitosamente

12. Verificar que la imagen recibida es apropiada. De lo contrario, revisar:

- que las conexiones eléctricas son las adecuadas,
- que el MFV está conectado en polarización directa,
- que la cámara está bien posicionada,
- que el enfoque es adecuado,
- que la cámara tiene el objetivo libre (no está tapada), etc.

Una imagen en total oscuridad puede ser causada por una polarización incorrecta del MFV o bien por diodos bypass en cortocircuito. Esto último se aprecia cuando la tensión cae a un mínimo y la corriente sube hasta el límite regulado.

13. Repetir los pasos 8 al 11 pero para tres diferentes niveles de corriente.

Se deben tomar tres imágenes a diferentes niveles de corriente, por lo que es necesario subir el voltaje hasta alcanzar:

- Una corriente igual o similar al 30% de la I_{MPP} del MFV y tomar una fotografía.
- Una corriente igual o similar al 60% de la I_{MPP} del MFV y tomar una fotografía.
- Una corriente igual o similar a I_{MPP} del MFV y tomar una fotografía.

14. Disminuir el voltaje de la fuente a 0 y desactivar la salida de la fuente con el interruptor secundario

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con las imágenes obtenidas es posible detectar roturas de las celdas, fracturas, microgrietas, interconexiones rotas, entre otras. También existen ciertos patrones de grietas los cuales están asociados con determinadas fallas.

En primer lugar, es posible realizar un ajuste de luminosidad/colores para hacer la imagen más legible, sin embargo, es importante destacar que este ajuste **NO** debe ser automático si no que debe ser realizado de manera manual, considerando que el ajuste del histograma debe ser idéntico para todas las fotos del ensayo, y para el mismo módulo en otras pruebas futuras.

Hay que tener particular cuidado con los módulos de silicio policristalino, ya que las imperfecciones en el cristal de silicio se muestran como zonas más oscuras en la imagen de electroluminiscencia. De igual manera, existen ciertos patrones que se asocian con defectos en el proceso de fabricación pero que no impactan en el desempeño del módulo.






Para referencias, se adjunta la Tabla 7.1, en el anexo 7.2, la cual contiene ejemplos de las fallas que es posible encontrar con esta prueba.

Por otra parte, es importante analizar con detalle los distintos tipos de grietas, ya que áreas que actualmente se encuentran operativas pueden quedar desconectadas en el futuro por acción de las grietas. Es posible clasificar las grietas en:

- Menores: cuando pueden llegar a desconectar a lo más un 1% del área del módulo.
- Considerables: cuando pueden llegar a desconectar a lo más un 20% del área del módulo
- Graves: cuando pueden llegar a desconectar áreas superiores al 20%

Para ejemplos de los distintos tipos de grietas y sus posibles ramificaciones, consultar el anexo 7.1.

En base a lo anterior, un MFV será etiquetado de la siguiente forma:

Etiqueta	Veredicto	Criterio
	El MFV pasa la prueba	No se encuentran fallas en las celdas o, a lo mas el 10% de las celdas del módulo presentan grietas menores
	El MFV pasa la prueba, con observaciones	A lo más 20% de las celdas presentan grietas menores, a lo más 10% de las celdas presentan grietas considerables, y en total, menos del 20% de las celdas presentan grietas.
	El MFV pasa la prueba <u>Podría ser reparado</u>	Se cataloga de “podría ser reparado” en caso de observar un substring apagado (no operativo).
	El MFV no es apto para generación	Presenta grietas graves
	El MFV no pasa la prueba, <u>Podría ser reparado</u>	Se cataloga de “podría ser reparado” en caso de observar dos o más substrings apagados (no operativos).

5 RECOMENDACIONES

Es recomendable agregar los datos importantes al nombre de la carpeta y al nombre del archivo. Una posibilidad es incorporar la marca y N.S. del MFV al nombre de la carpeta, mientras que en el nombre del archivo se puede anotar la corriente y el valor ISO.

Se recomienda prestar atención en la polaridad con la que se energiza el MFV, la cual debe ser directa (positivo con positivo). Un error típico es conectar el positivo de la fuente con el negativo del MFV. Ello hará que los diodos bypass se polaricen directamente, y, por lo tanto, la imagen de EL será de total oscuridad (ninguna celda se alcanza a activar).

Se recomienda usar el siguiente formato para nombrar a las fotografías:

E"Últimos5digitosdeINS"-AAMMDD_hhmm

Ilustrado con un ejemplo, el nombre del archivo de una fotografía tomada el 02 de enero de 2022 a las 10:15, a un MFV cuyo número de serie es 19130B151021120016090204, sería:

E90204-220102_1015

6 BIBLIOGRAFÍA

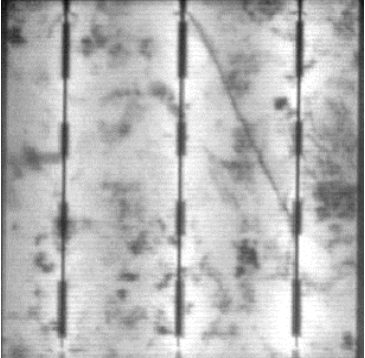
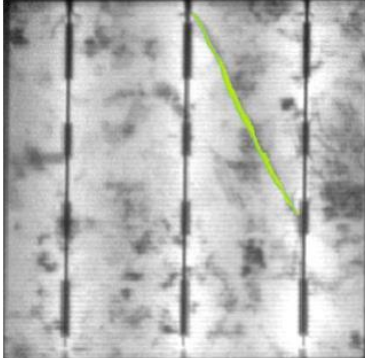
- [1] A. C. Parr, «A National Measurement System for Radiometry, Photometry, and Pyrometry Based upon Absolute detectors,» *Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD*, 1996.
- [2] T. Fuyuki y A. Kitiyanan, «Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing Electroluminescence,» *Applied Physics A*, vol. 96, pp. 189-196, 2009.
- [3] K. D. Edwards, «Light Emitting Diodes,» University of California, Irvine, 2019.
- [4] A. Petraglia y V. Nardone, «Electroluminescence in photovoltaic cell,» Second University of Naples, Department of Environmental Science, Napoli, 2011.

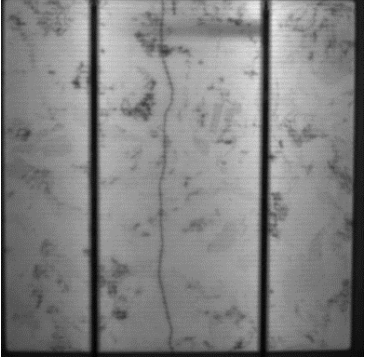
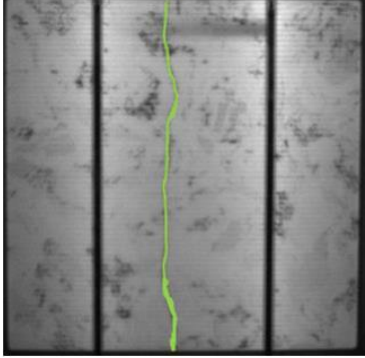
7 ANEXOS

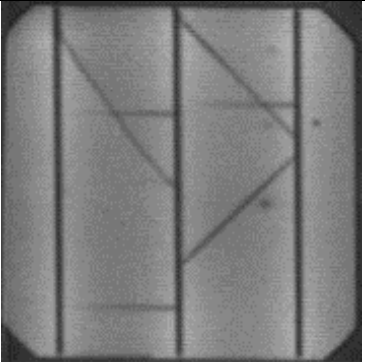
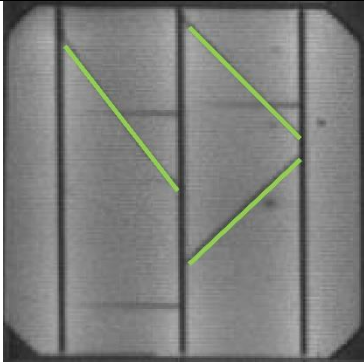
7.1 Grietas de las celdas vistas en EL

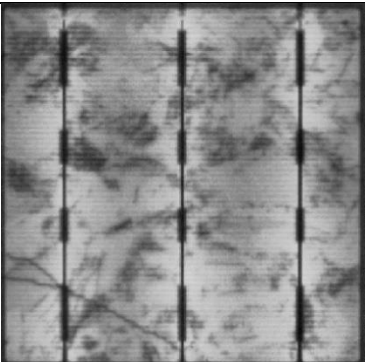
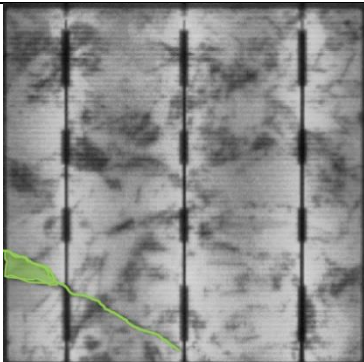
7.1.1 Grietas Menores

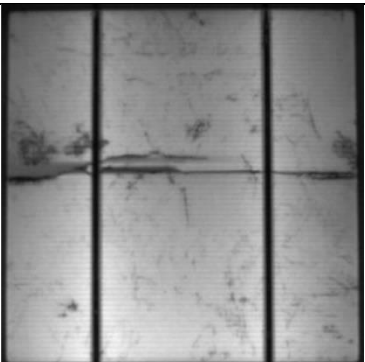
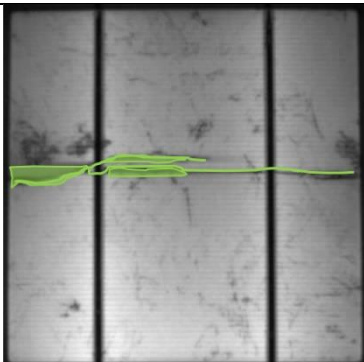
Si una grieta en la celda va en forma (casi) recta entre busbars no desconectará las áreas de la fuente de energía. Por lo que estas grietas se clasifican usualmente como “no críticas”. Usualmente no afectan en la degradación del módulo. Otras grietas o roturas de celda son aceptables si no presentan desconexión o bien el área afectada es a lo más del 1%.

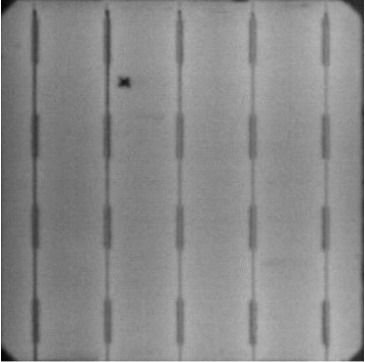
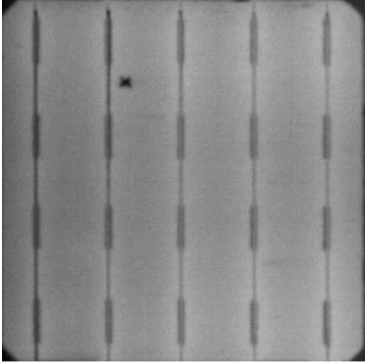
Grieta lineal simple	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Una grieta que va en línea recta entre las <i>busbars</i>		
Conclusión: No se espera que la grieta se pueda seguir expandiendo. Área con posibilidad de desconexión: 0%		

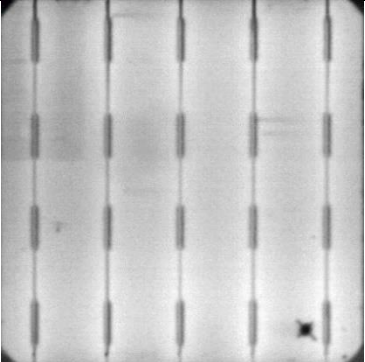
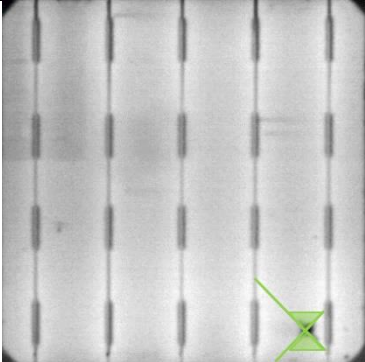
Grieta simple	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Una grieta que va paralela a las <i>busbars</i>		
Conclusión: No se espera que la grieta se pueda seguir expandiendo. Área con posibilidad de desconexión: 0%		

Grietas simples	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Varias grietas que van en línea recta entre las <i>busbars</i></p>		
<p>Conclusión: No se espera que la grieta se pueda seguir expandiendo. Área con posibilidad de desconexión: 0%</p>		

Grieta con forma de Y	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Los extremos de la grieta son una busbar y el borde de la celda</p>		
<p>Conclusión: No se espera que la grieta se pueda seguir expandiendo. Área con posibilidad de desconexión: <1%</p>		

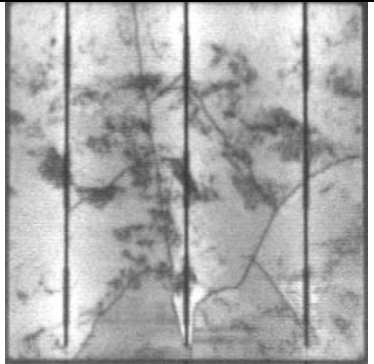
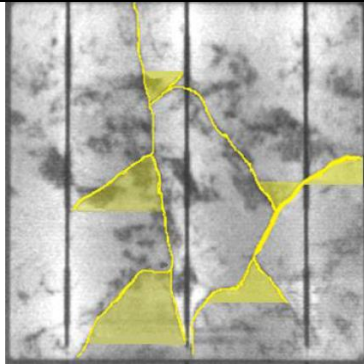
Grieta con forma de Y	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Grieta horizontal con bifurcación</p>		
<p>Conclusión: No se espera que la grieta se pueda seguir expandiendo. Área con posibilidad de desconexión: <1%</p>		

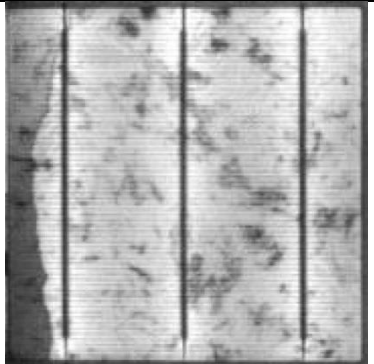
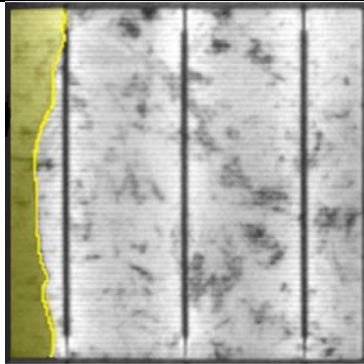
Grieta con forma de X	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Grieta diminuta con forma de cruz o X (≤ 5 mm). Causada por un estrés puntual en la celda</p>		
<p>Conclusión: Una expansión de la grieta es posible, pero el área desconectada sería muy pequeña. Una sola grieta con forma de X en la celda se considera menor.</p>		

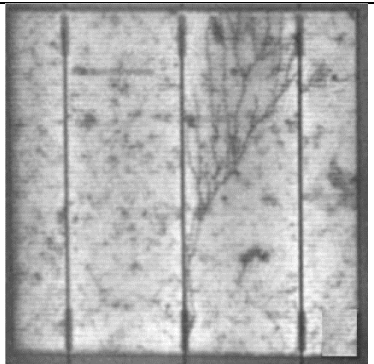
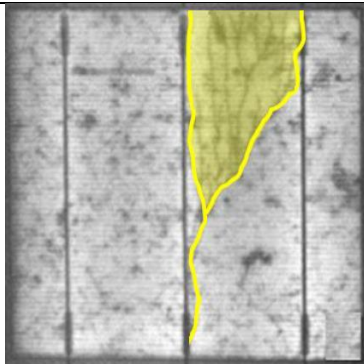
Grieta con forma de X	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Grieta grande con forma de cruz o X (≥ 5 mm) ubicada cerca de una <i>busbar</i></p>		
<p>Conclusión: Una expansión de la grieta es posible. El área desconectada sería menor al 1%</p>		

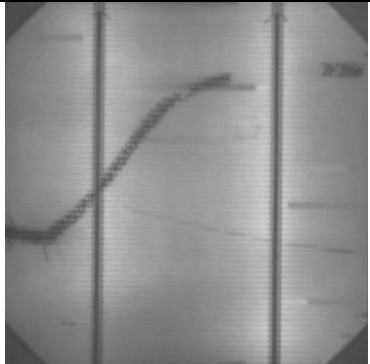
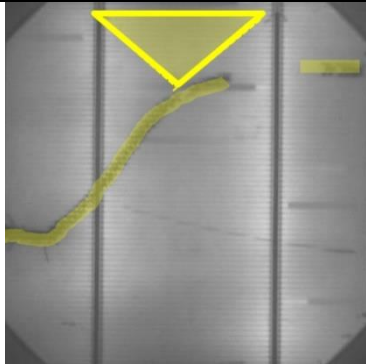
7.1.2 Grietas Considerables

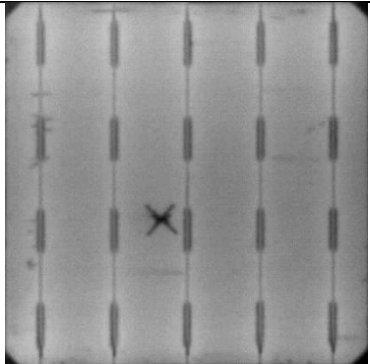
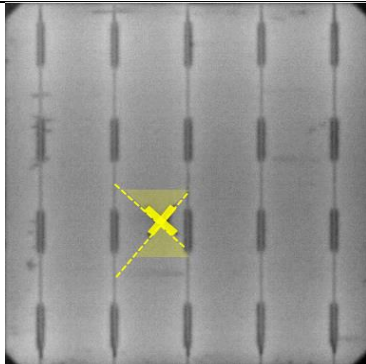
Grietas que pueden potencialmente desconectar áreas mayores al 1% y menores al 20% de la fuente de energía, o bien que ya lo hace.

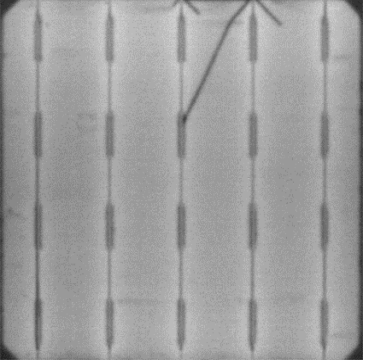
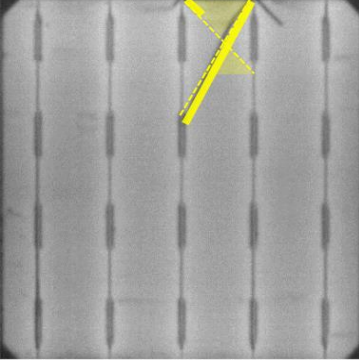
Grieta “Dendrítica”	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: varias grietas con forma de Y entre las <i>busbars</i></p>		
<p>Conclusión: Las grietas pueden llegar a desconectar aproximadamente el 10% de la celda</p>		

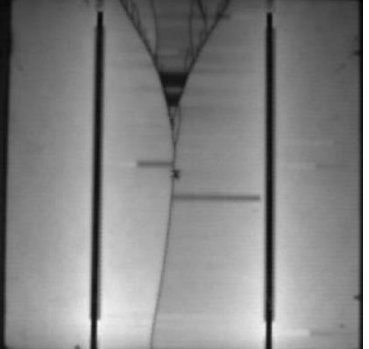
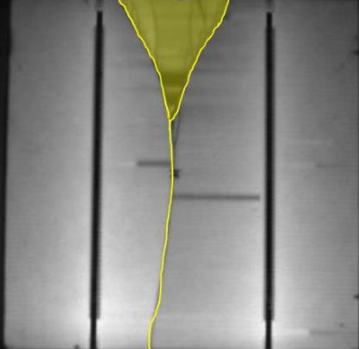
Grieta simple	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Rotura entre la <i>busbar</i> y el borde de la celda</p>		
<p>Conclusión: Posible desconexión del 10% de la celda</p>		

Grieta ramificada	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Una grieta con ramificaciones entre las <i>busbars</i></p>		
<p>Conclusión: Posible desconexión del 10% de la celda</p>		

Cross Crack	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Líneas iniciales de una <i>cross crack</i> causadas por daño en la <i>backsheet</i></p>		
<p>Conclusión: De magnitud considerable, ya que es incierto como se propagarán las grietas. Existe la posibilidad de que un área se desconecte, como se muestra en la imagen</p>		

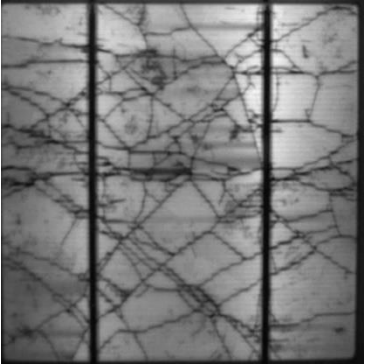

Cross Crack	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Gran grieta en <i>forma</i> de cruz o X, localizada entre <i>busbars</i></p>		
<p>Conclusión: De magnitud considerable, ya que puede llegar a desconectar un área mayor a un 1%</p>		

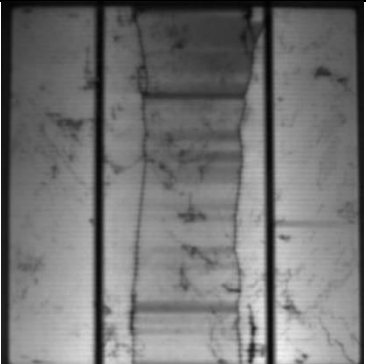
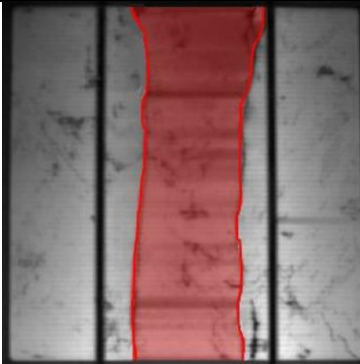
Múltiples Cross Cracks	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Múltiples grietas con forma de X, que tienen un impacto similar a una sola grieta con forma de X dentro de la celda</p>		
<p>Conclusión: De magnitud considerable, ya que puede entre ambas pueden llegar a desconectar un área mayor a un 1%</p>		

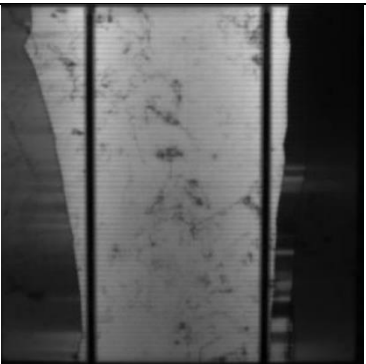
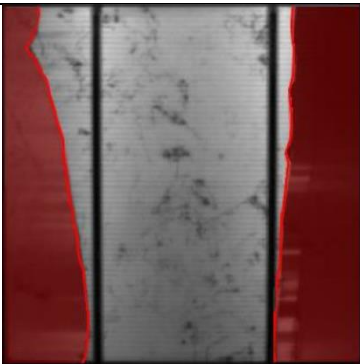
Grieta con forma de Y, ramificada	Imagen de EL	Imagen destacada
<p>Descripción: Rotura con forma de Y entre las busbars</p>		
<p>Conclusión: Posibilidad de desconectar aproximadamente el 10% de la celda</p>		



7.1.3 Grietas Graves

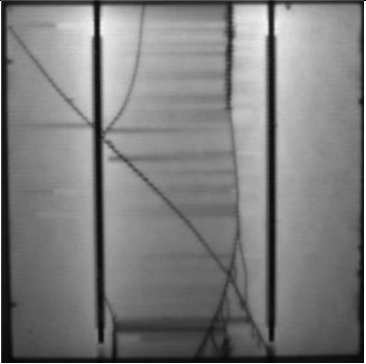

Grietas en las celdas que pueden potencialmente desconectar más del 20% el área de la celda.

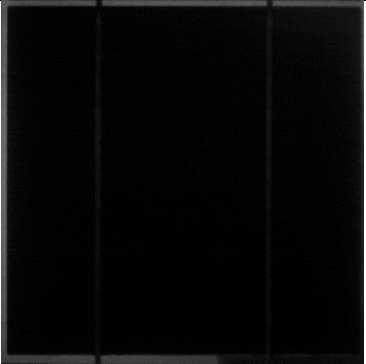
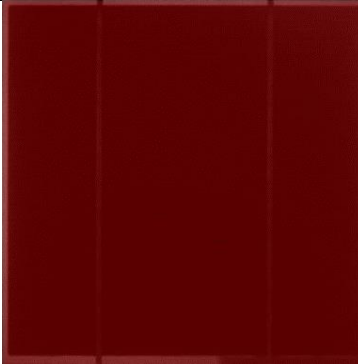
Grieta en forma de “telaraña”	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Múltiples grietas ramificadas		
Conclusión: Existe la posibilidad de que se desconecte un área mayor al 20% de la celda		

Grietas simples en paralelo	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: dos grietas que van en paralelo entre las busbars		
Conclusión: Existe la posibilidad de que se desconecte un área mayor al 20% de la celda		

Dos grietas simples	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Rotura con áreas inactivas entre las busbars y el borde de la celda		
Conclusión: Área desconectada mayor al 20%		

Grieta en forma de “telaraña”	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Varias roturas causadas por un impacto		
Conclusión: Existe la posibilidad de que se desconecte un área mayor al 20% de la celda		

Grietas Múltiples	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Varias grietas de diferente tamaño		
Conclusión: Las grietas tienen la posibilidad de desconectar un área mayor al 20%		

Celda Inactiva	Imagen de EL	Imagen destacada
Descripción: Celda completamente oscura		
Conclusión: Celda inactiva. 100% del área desconectada. Puede ser causado por problemas con las interconexiones o una rotura extrema		

7.2 Ejemplos de Fallas encontradas mediante EL

Tabla 7.1. Fallas detectadas mediante electroluminiscencia

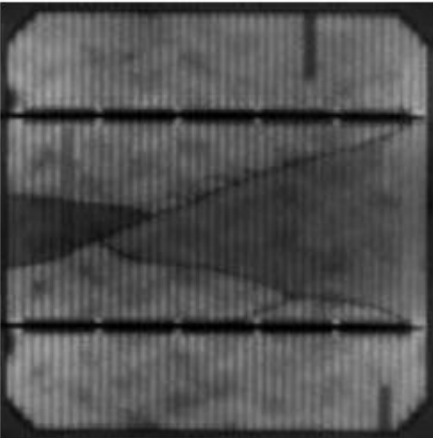
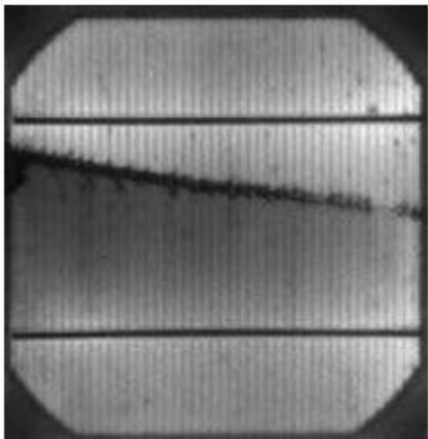
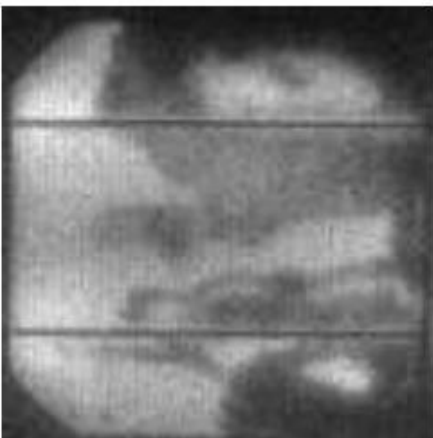
Imagen	Descripción
	Celda rota
	Celda agrietada
	Corrosión por humedad

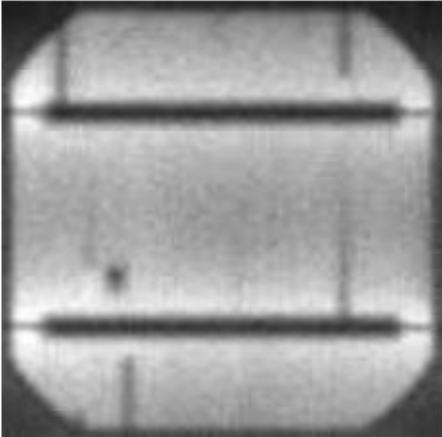
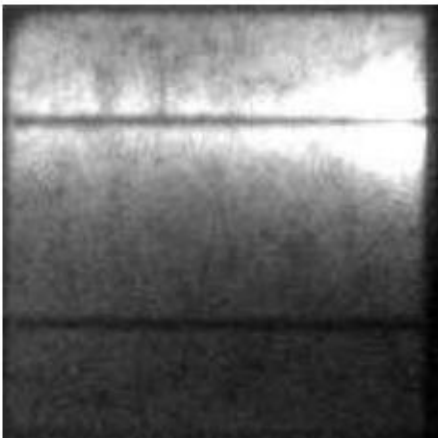
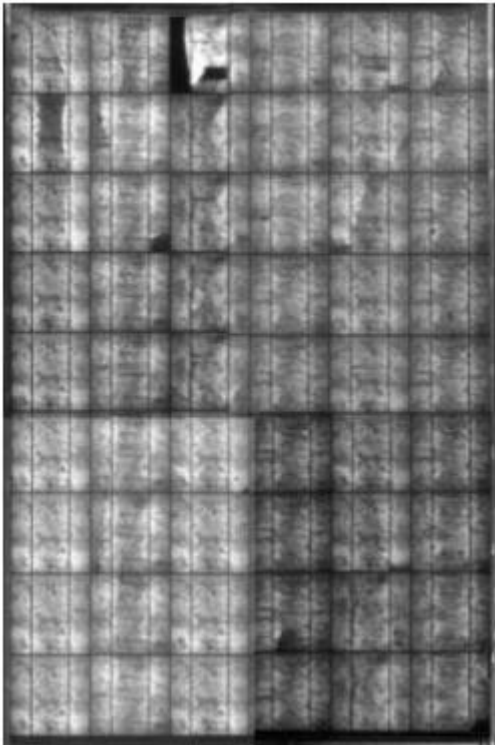
Imagen	Descripción
	<p>Shunts en una celda</p>
	<p>Rotura de la cinta de interconexión de celdas (cinta inferior)</p>
	<p>Celdas agrietadas de manera repetitiva debido a una falla en la producción (adicionalmente hay una celda rota)</p>

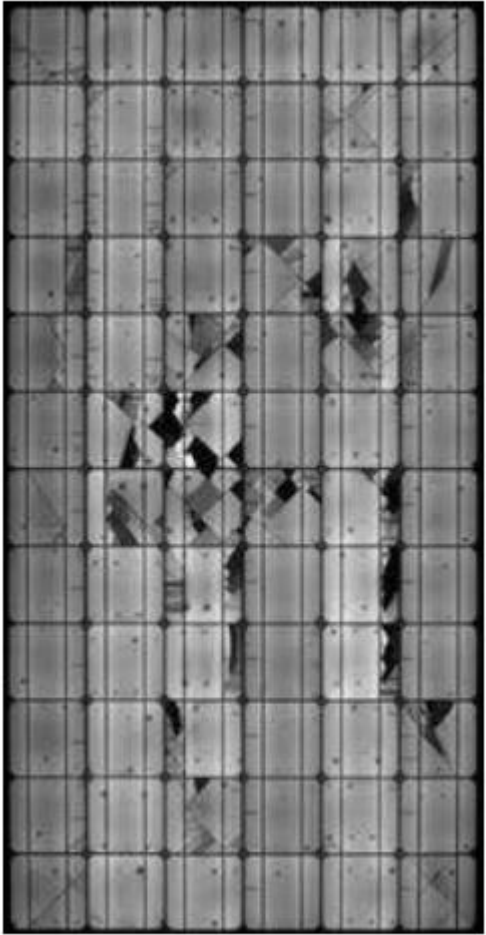
Imagen	Descripción
 A black and white electroluminescence (EL) image of a solar panel. The image shows a grid of rectangular cells. In the center of the panel, there is a prominent, dark, irregularly shaped area where the cells appear to be cracked or broken. This central area is surrounded by a grid of smaller, lighter-colored cells that appear to be intact. The overall appearance is that of a solar panel that has undergone mechanical stress, leading to cell failure in the center.	<p>Celdas agrietadas principalmente en el centro del módulo debido a una fuerza externa</p>

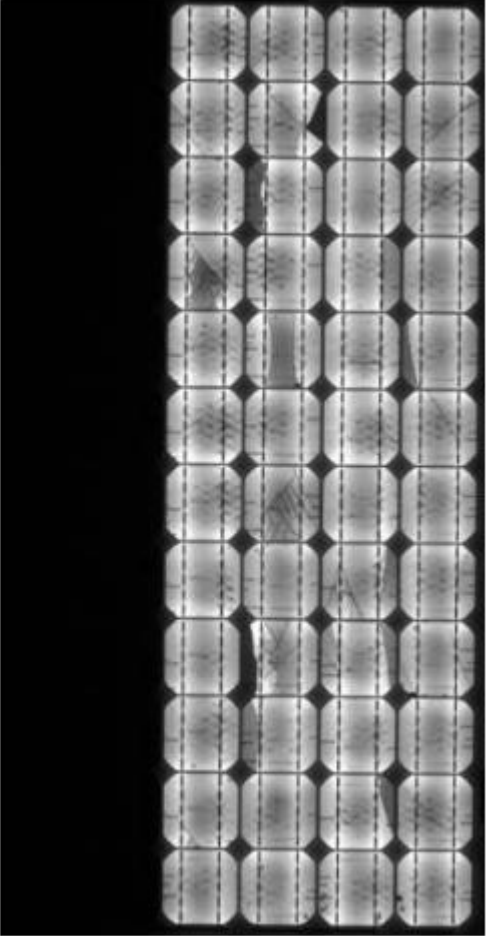
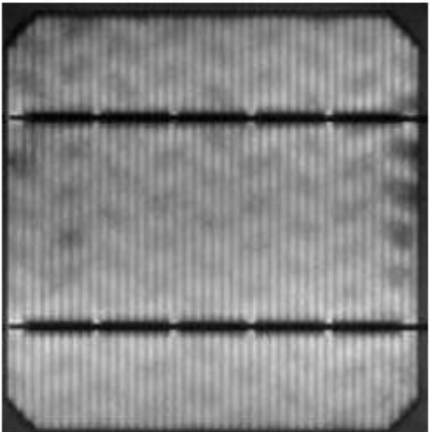
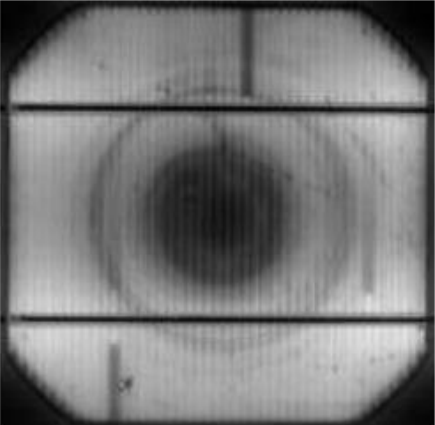
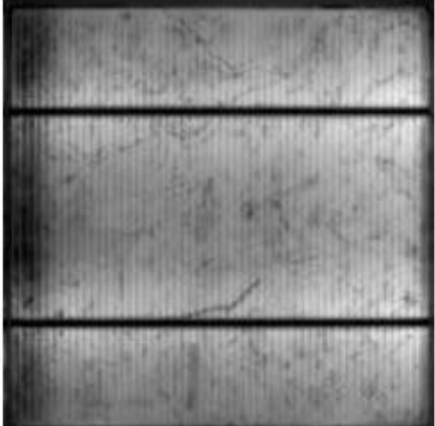
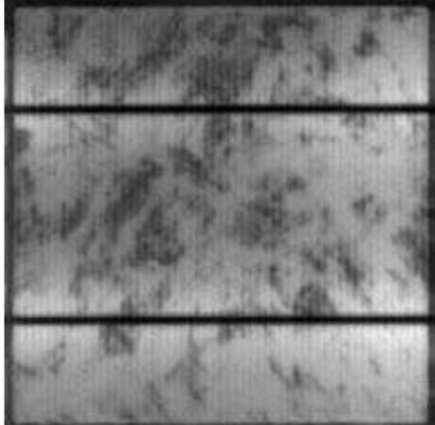
Imagen	Descripción
	<p>Sub-string no operativo</p>
	<p>Defecto durante el proceso de fabricación, no afecta el desempeño.</p>

Imagen	Descripción
	<p>Defecto durante el proceso de fabricación, no afecta el desempeño</p>
	<p>Celda fabricada con silicio ubicado en el borde de la oblea, no afecta el desempeño</p>
	<p>Defectos cristalográficos en silicio policristalino, no afecta el desempeño</p>

