



Universidad de Valladolid

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,
Agronómica y de la Bioenergía**

Campus de Soria

MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**TÍTULO: SISTEMA DE BAJO COSTE PARA LA REALIZACIÓN DE
ELECTROLUMINISCENCIA EN CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: IMPLEMENTACIÓN Y
COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS**

~~~~~

**AUTOR: DIEGO FERNÁNDEZ MARTÍNEZ**

**DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL**

**TUTORES: LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO Y VÍCTOR ALONSO GÓMEZ**

**SORIA, 22 DE SEPTIEMBRE DE 2022**

## ***AUTORIZACIÓN de los TUTORES del TRABAJO FIN DE MÁSTER***

D. LUIS HERNÁNDEZ CALLEJO y D. VÍCTOR ALONSO GÓMEZ,  
profesores del departamento de INGENIERÍA AGRÍCOLA Y FORESTAL  
como tutores del TFM titulado:

"SISTEMA DE BAJO COSTE PARA LA REALIZACIÓN DE ELECTROLUMINISCENCIA EN  
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: IMPLEMENTACIÓN Y COMPARACIÓN CON OTROS  
SISTEMAS",

presentado por el alumno D. DIEGO FERNÁNDEZ MARTÍNEZ

dan el Vº. Bº. y autorizan la presentación del mismo, considerando que el alumno ha  
desarrollado un TFM acorde con las expectativas del mismo.

Soria, 22 de septiembre. de 2022

Los tutores del TFM,

Fdo.: Luis Hernández Callejo

Fdo.: Víctor Alonso Gómez

# DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

D. DIEGO FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el trabajo fin de máster que presento para su exposición y defensa es el titulado “Sistema de bajo coste para la realización de electroluminiscencia en células fotovoltaicas: implementación y comparación con otros sistemas.”

**Declara la autoría y asume la originalidad de este trabajo y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.**

Soria, 22 de septiembre de 2022

Fdo.: DIEGO FERNÁNDEZ MARTÍNEZ

# RESUMEN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

TÍTULO: Sistema de bajo coste para la realización de electroluminiscencia en células fotovoltaicas: implementación y comparación con otros sistemas.

DEPARTAMENTO: Ingeniería Agrícola y Forestal.

TUTORES: Luis Hernández Callejo y Víctor Alonso Gómez.

AUTOR: Diego Fernández Martínez.

El presente Trabajo Fin de Máster tiene por objeto implementar un sistema de electroluminiscencia de bajo coste en células solares fotovoltaicas, así como comparar los resultados obtenidos con otros sistemas.

La tecnología solar fotovoltaica ha sufrido un gran incremento en los últimos años, provocando que el desarrollo de técnicas de detección de defectos, como la electroluminiscencia, sea necesario.

Para la creación del sistema de bajo coste se ha empleado una cámara comercial de silicio, a la cual se le ha extraído el filtro infrarrojo con el fin de que el sensor de la cámara sea capaz de apreciar la emisión del espectro que genera la electroluminiscencia.

A la cámara modificada se le han realizado un conjunto de pruebas adicionales, como la incorporación de distintos dispositivos, la variación de la corriente inyectada a las células o la modificación del tiempo de exposición para comprobar su efecto en los resultados.

Estos experimentos se han repetido en tres células solares fotovoltaicas de silicio y se han comparado con las imágenes obtenidas con una cámara de InGaAs.

Aunque estas imágenes han sido de mayor calidad debido a su gran sensibilidad, se ha comprobado que a través de la cámara modificada se pueden realizar diagnósticos fiables a nivel de célula.

De las pruebas realizadas se ha concluido que estas sí que afectan a los resultados obtenidos. Al incluir dispositivos adicionales las imágenes han variado bastante, destacando la aplicación del filtro pasabanda, cuya aplicación presenta tanto ventajas como desventajas.

También se ha comprobado que el incremento del tiempo de exposición y de corriente provocan una mejora en la técnica de electroluminiscencia, aunque esto deja de cumplirse cuando los valores son muy altos.



# ÍNDICE

## MEMORIA

|      |                                           |    |
|------|-------------------------------------------|----|
| 1.   | <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                 | 1  |
| 1.1. | OBJETIVO Y ALCANCE .....                  | 1  |
| 1.2. | MOTIVACIÓN DEL TRABAJO .....              | 1  |
| 2.   | <b>ESTADO DEL ARTE</b> .....              | 2  |
| 2.1. | SITUACIÓN ACTUAL.....                     | 2  |
| 2.2. | ELECTROLUMINISCENCIA.....                 | 5  |
| 3.   | <b>HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA</b> .....   | 16 |
| 3.1. | MATERIALES Y HERRAMIENTAS EMPLEADAS ..... | 16 |
| 3.2. | METODOLOGÍA .....                         | 19 |
| 4.   | <b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....   | 22 |
| 4.1. | VARIACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN .....  | 22 |
| 4.2. | PROGRESIÓN DE LOS DISPOSITIVOS .....      | 23 |
| 4.3. | VARIACIÓN DE LA CORRIENTE.....            | 25 |
| 5.   | <b>CONCLUSIONES</b> .....                 | 28 |
| 6.   | <b>NOMENCLATURA</b> .....                 | 30 |
| 7.   | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                 | 31 |

**ANEXO I: VARIACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN**

**ANEXO II: PROGRESIÓN DE LOS DISPOSITIVOS**

**ANEXO III: VARIACIÓN DE LA CORRIENTE**

**ANEXO IV: ANEXO D.1 DEL IEC TS 60904 – 13:2018**

**ANEXO V: DATASHEET RASPBERRY PI HIGH QUALITY CAMERA**

**ANEXO VI: DATASHEET RPI-6MM LENS**

**ANEXO VII: DATASHEET FUENTE DE ALIMENTACIÓN**

**ANEXO VIII: DATASHEET CÁMARA INGAAS**

**ANEXO IX: DATASHEET LENTE CÁMARA INGAAS**

**ANEXO X: DATASHEET CELULA SOLAR FOTOVOLTAICA**

**MEMORIA**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. OBJETIVO Y ALCANCE

El presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo general desarrollar una técnica de electroluminiscencia (EL) de bajo coste, la cual permita realizar la detección de los distintos fallos que se puedan presentar en una célula solar fotovoltaica (FV) a lo largo de su vida útil.

El alcance planteado para este proyecto es comparar la viabilidad de este sistema a nivel de laboratorio, estudiar la influencia de la variación del tiempo de exposición, inyección de corriente y aplicación de dispositivos adicionales, en la calidad de la imagen de EL obtenida, así como comparar las imágenes resultantes con dispositivos más sensibles a la emisión de EL.

## 1.2. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

Debido al incremento que ha presentado la tecnología solar FV en los últimos años, la instalación de módulos FV ha crecido de forma exponencial. Por este motivo, el desarrollo de las técnicas de detección de fallos en los paneles es fundamental para el análisis y mantenimiento de estos.

La electroluminiscencia, objeto del presente proyecto, es una de las técnicas de inspección fotovoltaica que presenta mayor interés ya que, al tratarse de una técnica no invasiva, permite una fácil y rápida detección de los defectos presentes en las células FV.

Esta técnica, la cual se ha desarrollado con mayor profundidad a nivel de laboratorio para células solares FV, requiere una evolución que permita su utilización a nivel de campo, es decir, en plantas FV. Entre los inconvenientes que presenta la EL puede destacarse el alto coste de los equipos de medición, los cuales al ser elementos con sensorica especializada, como las cámaras de InGaAs, provocan que sea una técnica costosa.

Debido a estos motivos, este Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo el desarrollo de una técnica de EL de bajo coste, a través de dispositivos de menor presupuesto, para comprobar su viabilidad a nivel de laboratorio.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. SITUACIÓN ACTUAL

#### 2.1.1. ENERGÍAS RENOVABLES A ESCALA GLOBAL

Como consecuencia de la pandemia global y la cuarentena masiva de la población causada por el COVID-19, la energía demandada en el año 2020 descendió considerablemente, entorno al 4%, principalmente como resultado del cierre temporal de las industrias.

Sin embargo, en este periodo las energías renovables alcanzaron su récord en la producción de energía eléctrica, con una estimación del 29% de la energía eléctrica producida globalmente.

En el año 2020, la capacidad instalada de energía renovable incrementó en 256 gigavatios, lo que supuso un incremento de cerca del 30 % respecto a su récord anterior. Además, mientras que las energías renovables se incrementaban, la industria de los combustibles sufrió una notable crisis debido a la disminución de la demanda [1].

 **TABLE 1.**  
Renewable Energy Indicators 2020


|                                                                                                                                      |             | 2019  | 2020         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|--------------|
| <b>INVESTMENT</b>                                                                                                                    |             |       |              |
| New investment (annual) in renewable power and fuels <sup>1</sup>                                                                    | billion USD | 298.4 | <b>303.5</b> |
| <b>POWER</b>                                                                                                                         |             |       |              |
| Renewable power capacity (including hydropower)                                                                                      | GW          | 2,581 | <b>2,838</b> |
| Renewable power capacity (not including hydropower)                                                                                  | GW          | 1,430 | <b>1,668</b> |
|  Hydropower capacity <sup>2</sup>                 | GW          | 1,150 | <b>1,170</b> |
|  Solar PV capacity <sup>3</sup>                   | GW          | 621   | <b>760</b>   |
|  Wind power capacity                              | GW          | 650   | <b>743</b>   |
|  Bio-power capacity                               | GW          | 137   | <b>145</b>   |
|  Geothermal power capacity                        | GW          | 14.0  | <b>14.1</b>  |
|  Concentrating solar thermal power (CSP) capacity | GW          | 6.1   | <b>6.2</b>   |
|  Ocean power capacity                             | GW          | 0.5   | <b>0.5</b>   |

Figura 1: Potencia renovable instalada globalmente (Fuente: Renewable Energy Indicators 2020).

A través de la Figura 1 puede observarse el incremento que se produjo en las energías renovables entre los años 2019 y 2020, realizándose la importancia que presentan actualmente las energías renovables, así como la descarbonización de los sistemas de

producción eléctrica, ya que a pesar de encontrarse en una crisis sanitaria donde los principales esfuerzos se hallaban en solventar los efectos del COVID-19, la capacidad instalada de energías renovables continuó incrementándose.

En el caso de la tecnología solar fotovoltaica, el incremento en este periodo fue de 139 GW de potencia instalada.

## 2.1.2. FOTOVOLTAICA A ESCALA GLOBAL

Como se ha comentado previamente, a pesar de la situación del COVID-19, las energías renovables sufrieron un gran incremento en la capacidad instalada a nivel global, destacando especialmente la tecnología solar fotovoltaica, la cual sufrió un aumento de 139 GW en el año 2020, alcanzando un total de 760 GW.

En la Figura 2 puede observarse que la tendencia que ha seguido esta tecnología es exponencial, lo que prevé que la capacidad instalada siga aumentando en los años venideros [1].

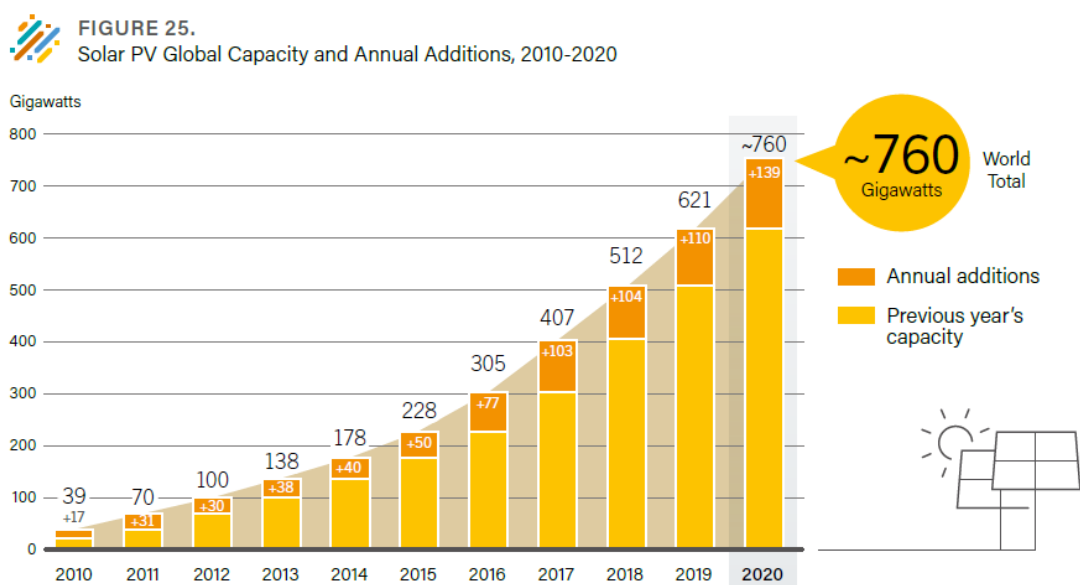


Figura 2: Potencia fotovoltaica instalada global del 2010-2020 (Fuente: Instituto Becquerel y IEA PVPS).

Entre los motivos por los que se ha incrementado esta tecnología se encuentran las tendencias culturales y políticas, como son la Agenda 2030, los Objetivos de Desarrollo Sostenible o el Acuerdo de París, entre los cuales algunos de sus objetivos son el fomento de las energías renovables para lograr la descarbonización de la producción de

energía eléctrica, así como reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles, cuyo coste se ha incrementado en gran medida los últimos años [2].

Además, la solar FV ha visto reducidos sus costes de producción, lo que la ha convertido en una tecnología con precios muy competitivos, haciéndola muy rentable principalmente por su carácter modular, lo que permite su empleo tanto en entornos urbanos como en grandes plantas fotovoltaicas, demostrando la gran flexibilidad que presenta esta tecnología.

En el año 2019 el coste medio de la FV por capital para una planta se situaba en 0.995 €/ W, mientras que el mínimo de ese año fue 0.618 €/ W [3].

### 2.1.3. ENERGÍAS RENOVABLES A ESCALA NACIONAL

Las energías renovables en España han seguido una tendencia similar a la del nivel global, presentando un gran incremento especialmente en los últimos años.

En 2020 la potencia total instalada fue de 110.839 MW, de los cuales el 54 % fueron tecnologías renovables. La producción eléctrica a través de renovables representó el 45,5 %, máximo de los últimos años debido al incremento de la producción hidráulica y fotovoltaica principalmente [4].

A través de la Figura 3 puede observarse la evolución que han presentado las energías renovables desde el año 2005 hasta el año 2019, concluyéndose que la capacidad instalada renovable se ha duplicado en este periodo [5].

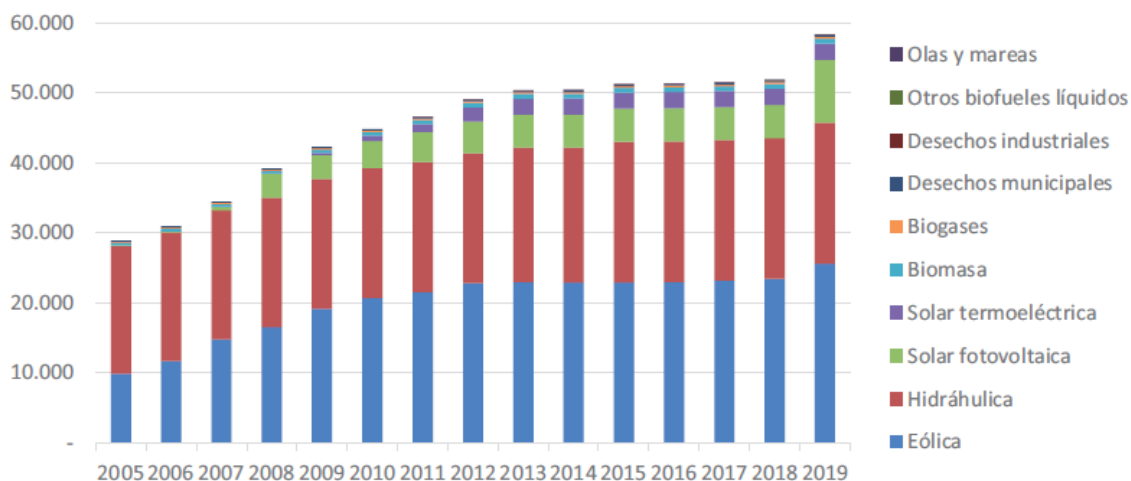


Figura 3: Potencia eléctrica renovable por tecnología 2005-2019 (Fuente: MITERD).

## 2.1.4. FOTOVOLTAICA A ESCALA NACIONAL

La tecnología fotovoltaica ha sufrido un incremento exponencial, triplicando en los últimos 4 años la potencia instalada.

La tendencia desde el año 2010 hasta el año 2021 se observa en la Figura 4, viéndose que la potencia se mantuvo constante hasta el año 2018, donde debido al cambio del marco regulatorio de estas tecnologías, se incrementó enormemente su demanda e instalación [6].

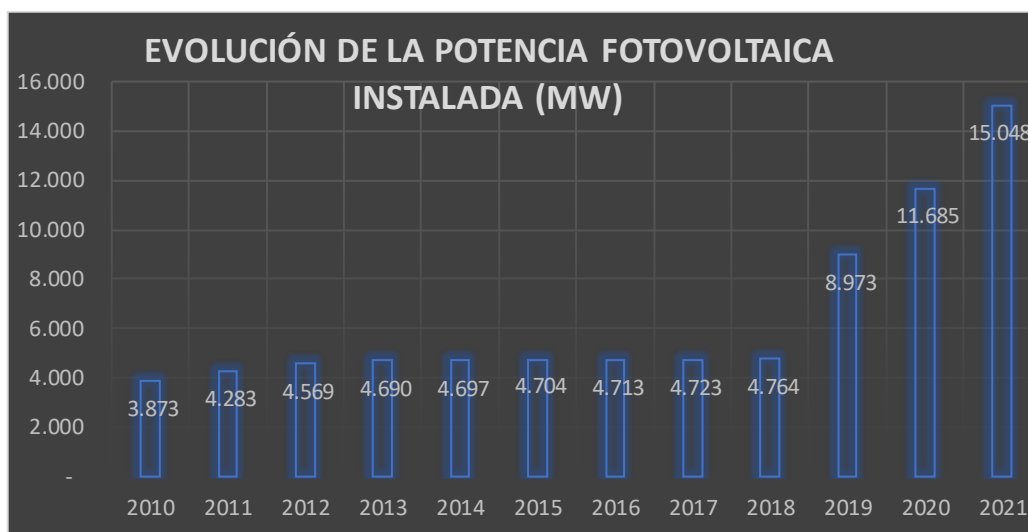


Figura 4: Evolución de la potencia instalada fotovoltaica en MW en España (Fuente: Red Eléctrica de España)

## 2.2. ELECTROLUMINISCENCIA

### 2.2.1. INTRODUCCIÓN

Debido al gran incremento de potencia instalada que ha sufrido la tecnología solar fotovoltaica en los últimos años, superior al 30% entre los años 2019 y 2020 en España, así como a su instalación de forma masiva alrededor del planeta, cada vez es más necesario el desarrollo de nuevas técnicas que permitan la inspección del estado y funcionamiento de las células solares.

El análisis de la degradación de los módulos fotovoltaicos resulta de gran importancia para asegurar la vida útil y la viabilidad económica de estos sistemas. El trabajo en campo es una de las mejores maneras de observar y detectar todos los tipos de

degradación, lo cual permite conocer el funcionamiento real de los paneles fotovoltaicos [7].

Entre las diferentes técnicas de inspección que existen para paneles fotovoltaicos, se pueden enumerar la termografía, el análisis de la curva IV, la inspección visual y la electroluminiscencia entre otras. De estas diferentes técnicas destaca la electroluminiscencia, ya que permite ver con perfecta claridad los daños y defectos que se producen en las células, tales como roturas, cracks, fingers... lo que facilita evaluar de forma rápida y precisa el estado de las células fotovoltaicas [8].

Esta técnica, que se implementa mayoritariamente a nivel de laboratorio, consiste en realizar el proceso inverso al que realiza un panel fotovoltaico de forma natural, es decir, en vez de que el panel genere un flujo de corriente eléctrica a través de la radiación solar, se le inyecta a este una corriente eléctrica para que emita luz.

## 2.2.2. EFECTO FOTOVOLTAICO

Uno de los procesos fundamentales en los que se basa la tecnología solar fotovoltaica es un caso concreto del efecto fotoeléctrico, el efecto fotovoltaico, el cual ocurre cuando los fotones, paquetes energéticos presentes en la luz, alcanzan una unión pn de materiales semiconductores, provocando una diferencia de potencial entre ambos.

Las células fotovoltaicas aprovechan este efecto a través del uso de materiales semiconductores dopados positiva o negativamente, entendiéndose por semiconductor aquel material capaz de permitir el movimiento de los electrones según las condiciones físicas en las que se encuentren. Uno de estos condicionantes es la radiación solar, la cual cuando incide en los semiconductores (generalmente silicio), provoca la generación de pares electrón-hueco.

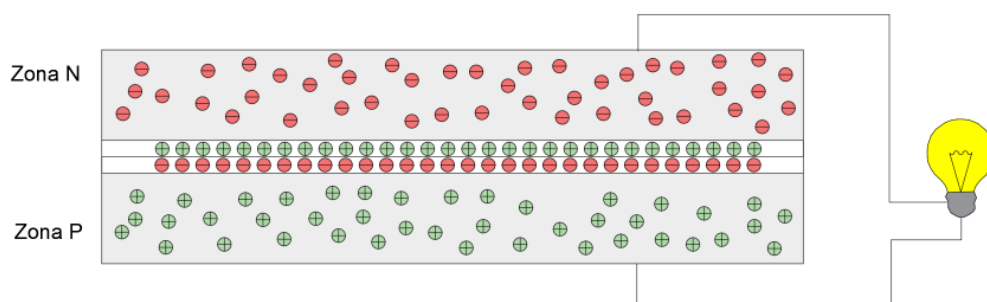


Figura 5: Esquema funcionamiento unión PN (Fuente: Elaboración propia).



Sin embargo, a pesar de que un semiconductor sea excitado para que actúe como conductor, esto no genera una diferencia de potencial aprovechable, es decir, no produce electricidad.

Para esto es necesario el dopado del semiconductor, pudiendo ser dopado positivamente (impureza aceptora), introduciendo elementos con un electrón menos en la última capa que el material semiconductor empleado, como por ejemplo el boro en el caso del silicio. Como la capa ahora tiene menos electrones de los que debería tener para encontrarse en equilibrio, el semiconductor sería un semiconductor tipo p, pues la carga es positiva.

Por otro lado, si el semiconductor es dopado negativamente (impureza donadora), se introducen elementos con un electrón más en la última capa que el semiconductor empleado, como por ejemplo el fósforo en el caso del silicio. Como la capa no se encuentra en equilibrio ya que presenta más electrones de los que debería, el semiconductor será tipo n, pues su carga es negativa [9].

### **2.2.3. DISPOSITIVOS NECESARIOS**

Entre los dispositivos necesarios para realizar la técnica de electroluminiscencia en células fotovoltaicas se encuentran las cámaras de EL, pudiéndose descomponer esta en cámara, lente y filtros; el ambiente en oscuridad y la fuente de alimentación.

Para el tratamiento de las imágenes también pueden utilizarse softwares específicos para realizar el correcto procesado.

#### **2.2.3.1. CÁMARA ELECTROLUMINISCENCIA**

##### **2.2.3.1.1. CÁMARA**

Las cámaras están compuestas por dispositivos en los cuales se encuentran píxeles sensibles a la luz, generalmente de carga acoplada (CCD) o de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) [10].

Un análisis más exhaustivo de las características que puede presentar los tipos de cámaras según su clase puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 1: Tipos de cámaras de EL y sus parámetros característicos (Fuente: IEA).

| Parámetros            |                      | Clase Baja        | Clase Media        | Clase Profesional  |
|-----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Tipo de sensor        |                      | CDD               | CMOS/CDD           | CMOS/CDD           |
| Resolución            | CDD                  | <1 megapixel      | 1-5 megapixel      | >5 megapixel       |
|                       | CMOS                 |                   | 320 x 256          | 640 x 512          |
| Sensibilidad          | Rango dinámico       | 2500 : 1          | 5000 : 1           | 10000 : 1          |
|                       | Tiempo de exposición | >10 s             | 1-10 s             | <1 s               |
| Banda espectral       |                      | Si (0.3 – 1.1)    | Si (0.3 – 1.1)     | Si (0.3 – 1.1)     |
|                       |                      |                   | InGaAs (0.7 – 2.6) | InGaAs (0.7 – 2.6) |
| Condiciones de Prueba |                      | Crepúsculo/ noche | Crepúsculo/ noche  | Crepúsculo/ noche  |

Para obtener una mejor señal y reducir el ruido obtenido en la imagen las cámaras pueden ser enfriadas, aunque esta situación no se da siempre.

Los semiconductores de la cámara que se encargan de absorber la luz deben ser capaces de percibir la luz emitida por la EL, pudiéndose observar en la Figura 6 los diferentes rangos que cubren algunos de los materiales más empleados en los sensores de las cámaras.

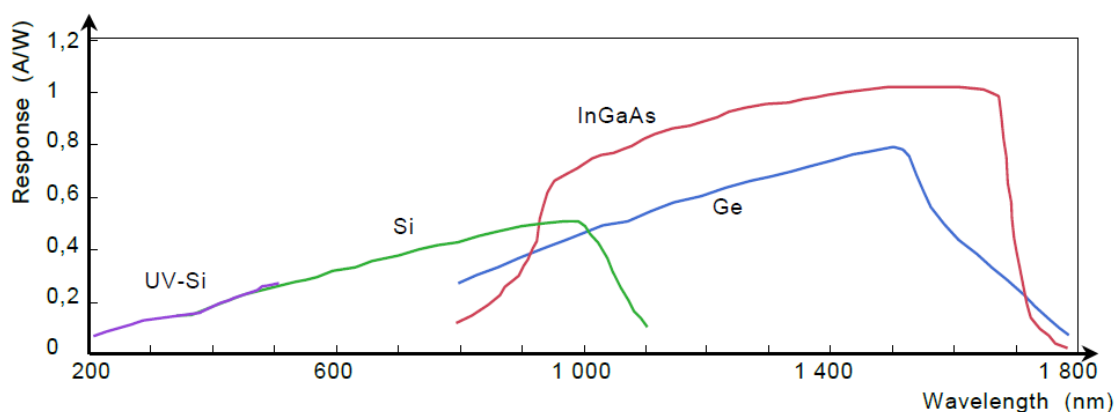


Figura 6: Respuesta espectral absoluta según el material semiconductor del detector (Fuente: IEC TS 60904).

Sin embargo, la luz que emite la técnica de electroluminiscencia también varía según el material del que este compuesto las células solares fotovoltaicas, siendo el más

general el silicio, cuyo espectro presenta una mayor intensidad en los 1150 nm, como puede apreciarse en la

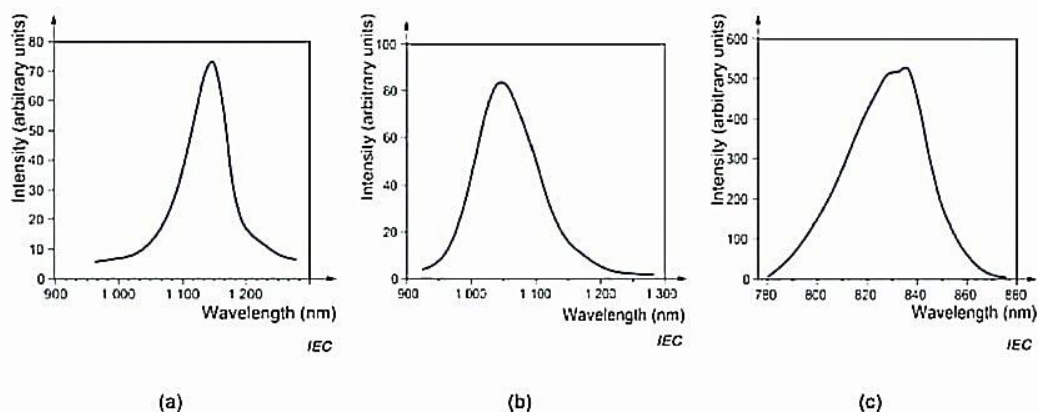


Figura 7, en la gráfica (a).

Realizando una comparación de las dos figuras se puede llegar a la conclusión de que los materiales óptimos de los que debe estar compuesto el detector son en primer lugar el InGaAs y después el germanio.

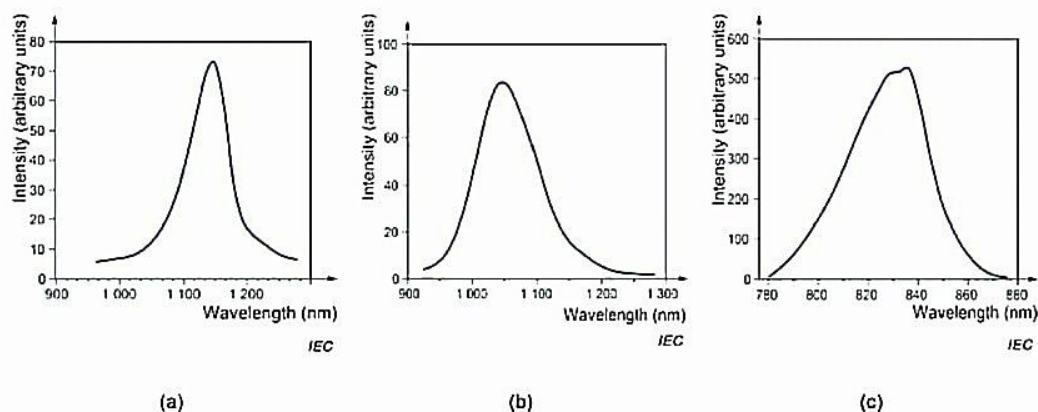


Figura 7: Emisión espectral de la electroluminiscencia de (a) Silicio, (b) ZnO/ CdS/ Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) y (c) CdS/CdTe (Fuente: IEC TS 60904).

Sin embargo, el alto coste de los detectores compuestos por estos materiales en comparación con las cámaras de silicio hace que estas presenten un gran interés, ya que incrementando el tiempo de exposición de estas últimas se pueden tomar imágenes de EL con la calidad suficiente como para detectar fallos en las células FV.

Otro factor que influye a la resolución de las imágenes, así como la señal de la EL, es la perpendicularidad de la cámara y cercanía de esta a la zona de estudio. En

determinados casos para obtener imágenes de una alta resolución se requiere incrementar el tiempo de exposición [11].

### 2.2.3.1.2. LENTES

Las lentes no deben presentar filtros de absorción que puedan dificultar o bloquear el paso de la banda infrarroja cercana que emite el material semiconductor al tomar la imagen de EL.

Entre los parámetros más importantes que caracterizan a una lente se encuentran la distancia focal y el ángulo de visión.

La distancia focal, medida en mm, indica la distancia que hay entre el centro óptico del objetivo y el sensor de la cámara. Cuanta mayor es la distancia o longitud focal, mayor será la distancia a la que podrá tomarse una imagen. El ángulo de visión representa el ángulo que es capaz de capturar la cámara, y mantiene una relación proporcionalmente inversa con la longitud focal, ya que cuanto mayor sea el ángulo de visión menor será la distancia focal.

Esta relación puede observarse en la Figura 8, mostrando los tipos de imágenes que pueden tomarse según varía la longitud focal y el ángulo de visión [12].

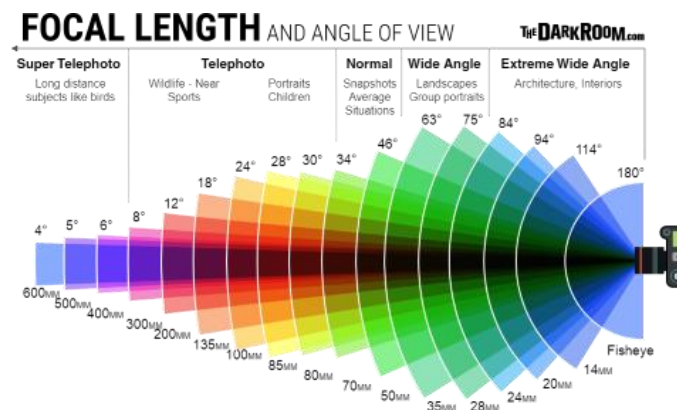
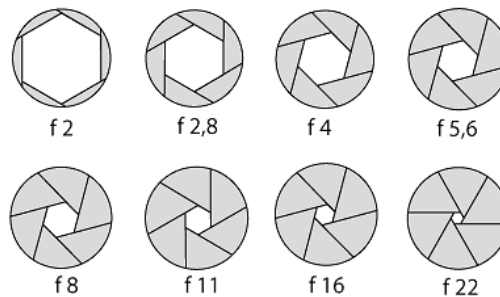


Figura 8: Relación entre la distancia focal y el ángulo de visión (Fuente: DarkRoom)

El valor de estos parámetros variará según la aplicación concreta y las características geométricas del emplazamiento.

Uno de los aspectos a tener en cuenta es el ángulo de visión, ya que si este es demasiado amplio, puede provocar la generación de distorsiones de barril en las imágenes, así como la cámara también tendrá que situarse más cerca del objeto a medir.

Otro parámetro importante en las lentes es la apertura de estas, la cual se contempla a través del número “ $f$ ”. Este número, resultante de dividir la distancia focal entre la apertura, es una medida cuantitativa de la velocidad del objetivo, lo que resulta en que cuanto más bajo sea este número, mayor será la apertura del objetivo. Esta relación puede observarse con mayor claridad a través de la Figura 9.

DIAFRAGMA. Números  $f$ Figura 9: Relación entre el número  $f$  y la apertura del diafragma (Fuente: AulaClic).

Por este motivo cuanto más grande sea el número  $f$ , menor será la apertura de la lente, lo que resulta en una menor cantidad de luz procedente de la electroluminiscencia que incide sobre el sensor fotosensible de la cámara [13].

### 2.2.3.1.3. FILTROS

Los filtros son herramientas complementarias muy útiles a la hora de realizar EL, ya que impiden el paso las longitudes de onda no comprendidas en la emisión espectral de la electroluminiscencia, lo que incrementa la calidad de las imágenes obtenidas [11].

El mayor inconveniente de este tipo de herramientas suele ser su coste, ya que debido a su etapa de diseño, suele alcanzar precios elevados.

## **2.2.3.2. CONDICIONES AMBIENTALES**

Las condiciones ambientales que presentan mayor impacto a la hora de tomar imágenes de EL son la oscuridad y la temperatura ambiente.

### **2.2.3.2.1. OSCURIDAD**

A la hora de obtener imágenes de mayor calidad es preferible ambientes oscuros, por lo que hay que evitar la incisión de luz directa en el emplazamiento donde van a ser tomadas las imágenes. La técnica de electroluminiscencia se realiza principalmente a dos niveles, a nivel de laboratorio y a nivel de campo.

Si se realiza en un laboratorio, pueden usarse diferentes elementos para bloquear la entrada de la luz, como muros, cortinas o el cierre de huecos a través de materiales que absorban la luz de forma natural (en general materiales de color negro).

Sin embargo, si las medidas se realizan en un ambiente exterior, se buscará reducir en la medida de lo posible la incidencia de luces externas. Una forma de conseguir esto es la toma de imágenes por la noche.

En el caso de tener que realizar la electroluminiscencia con la incidencia de luz directa, será necesario restar esta de la imagen, generalmente a través de softwares específicos para el tratamiento de imágenes.

### **2.2.3.2.2. TEMPERATURA**

A la hora de tomar medidas a nivel de laboratorio, es preferible realizar la EL manteniendo las células o módulos a una temperatura ambiente comprendida entre los 20 y 30 °C, ya que los estándares actuales toman este rango de temperaturas como idóneo [11].

### **2.2.3.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN**

Una fuente de alimentación de corriente continua es necesaria a la hora de realizar la técnica de electroluminiscencia, ya que es necesario aplicar una corriente similar a la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de las células, módulos o strings que se desean inspeccionar.

Para lograr este objetivo es necesario que la fuente de alimentación sea capaz de suministrar el suficiente voltaje para alcanzar la  $I_{sc}$ . Aunque depende de la tecnología fotovoltaica que se emplee, la tensión necesaria suele ser similar al voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ).

Mientras que la electroluminiscencia se ejecuta, se puede realizar la medición del voltaje en el módulo para obtener información adicional respecto al estado en el que se encuentra, pudiéndose obtener datos sobre la resistencia en paralelo, la resistencia en serie así como del conexionado del módulo. Para obtener una medición fiable es necesario que la caída del voltaje en los cables sea menor al 2 %.

El control de la fuente de alimentación y de la cámara a través del ordenador es un equipo opcional que incrementa la precisión y velocidad de la toma de imágenes de EL gracias a la coordinación entre la aplicación de la corriente y la captura de la fotografía, por lo que es de gran interés a nivel de campo [11].

Otra alternativa muy interesante que comenzó a implementarse en los últimos años ha sido la utilización de inversores bidireccionales, los cuales permiten realizar la técnica de electroluminiscencia de forma no invasiva, sin la necesidad de la desconexión de los módulos o la utilización de una fuente de alimentación externa.

Este aparato ofrece varias ventajas, como una mayor velocidad en la toma de imágenes, así como un menor riesgo para los operarios, ya que no se deben manipular dispositivos eléctricos [14].

#### **2.2.3.4. TOMA DE IMÁGENES**

A la hora de realizar la toma de imágenes de EL pueden emplearse tanto soportes fijos como drones según el ambiente en el que se vaya a realizar la técnica, empleándose soportes fijos cuando se realiza a nivel de laboratorio o soportes fijos y drones si se realiza a nivel de campo.

Aunque de forma general el empleo de soportes fijos obtiene unos resultados más precisos y de mayor calidad, presentan el inconveniente de requerir un mayor tiempo para realizar la electroluminiscencia, como puede apreciarse en la Figura 10.

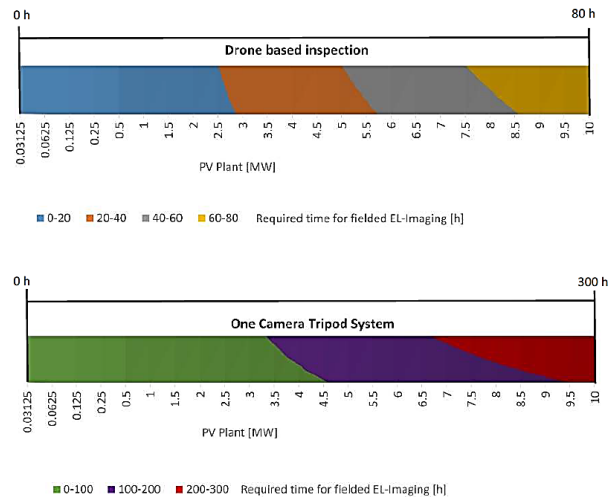


Figura 10: Tiempo requerido para realizar electroluminiscencia con dron o con soporte fijo según la potencia nominal instalada (Fuente: IEA).

La utilización de drones para la inspección y mantenimiento de las plantas fotovoltaicas ha adquirido popularidad en los últimos años debido a la capacidad de realizar tanto técnicas de termografía como de electroluminiscencia cuando se acopla la sensórica necesaria [14].

Sin embargo, para las inspecciones aéreas no todas las cámaras de electroluminiscencia son apropiadas, ya que debido a la mayor distancia e inestabilidad se requieren cámaras con mayor sensibilidad y menor tiempo de exposición.

Cuando se realizan estas inspecciones aéreas es recomendable el acople al dron de un sensor que mida la distancia, así como de poder controlar remotamente la distancia focal de la cámara.

## 2.2.4. FALLOS DETECTABLES

Gracias a la electroluminiscencia se pueden diagnosticar varios tipos de defectos en las células fotovoltaicas de silicio:

- Pérdida, rotura o delaminación de los “**Fingers**” de la malla de metalización.
- Reducción de la vida útil por la silicona de origen.
- Marcas de neumático (“**belt marks**”).
- Adherencia de obleas durante el procesado.
- Contaminación de la célula u oblea.



- Gran reducción de la vida útil de la célula.
- Degradación por PID (Degradación Inducida por Potencial).
- Mala interconexión.
- Roturas (“**cracks**”) paralelos a los “**bus bars**”.
- Roturas (“**cracks**”) perpendiculares a los “**bus bars**” (Figura 11).
- Mala soldadura de los buses de conexión.
- Interacción de la pasta flux de soldadura con la malla de metalización.



Figura 11: Cracks perpendiculares a los bus bars (Fuente: IEC TS 60904 - 13:2018).

Un mayor desarrollo así como ejemplos visuales de estos defectos puede apreciarse en el Anexo D.1 del IEC TS 60904 – 13:2018 el cual corresponde con el Anexo IV de este Trabajo Fin de Máster.

## 3. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

### 3.1. MATERIALES Y HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Los materiales que se han empleado para la realización de la técnica de electroluminiscencia de bajo coste son:

- **Raspberry Pi:** Este dispositivo consiste en un ordenador con una placa base reducida a un bajo coste. Entre las características que destacan de estos ordenadores se puede destacar el software que emplea, el cual es de código abierto, así como la gran cantidad de dispositivos o accesorios que son compatibles con la Raspberry Pi.
- **Raspberry Pi High Quality Camera:** Este periférico de la Raspberry Pi es una cámara de 12.3 megapíxeles, con una resolución de 4056 píxeles en horizontal por 3040 píxeles en vertical. Otra de sus características es su capacidad para trabajar con distintas lentes intercambiables, pudiéndose acoplar monturas C o Cs, lo cual ha sido fundamental para su uso en este trabajo.

Una descripción más detallada de este producto puede encontrarse en el Anexo V.

- **RPI- 6mm Lens:** Esta lente de 6 mm de distancia focal ha sido utilizada para la toma de imágenes de electroluminiscencia. Este dispositivo, compatible con la cámara “Raspberry Pi High Quality Camera”, presenta un ángulo de visión de 63°.

En el Anexo VI se encuentran los datos técnicos de este producto.

- **Entorno de oscuridad:** A la hora de realizar imágenes de EL, como se ha visto en apartados anteriores, la oscuridad es fundamental para obtener resultados de calidad. Para lograr este ambiente se han empleado materiales reciclados con el objetivo de generar un espacio aislado que dificulta el acceso de la luz.
- **Pirámide negra:** Debido a los reflejos que se pueden producir en el interior del entorno de oscuridad, se decidió utilizar una pirámide de color negro que actúe de mampara y evite la aparición de reflejos u otros errores en la toma de imágenes de electroluminiscencia. Se emplea de color negro debido a la alta absorción de la luz que presenta este color.

- **Filtro pasabanda:** El filtro que se ha empleado ha sido un “SWIR BP Filter” el cual permite el paso de un rango del espectro desde los 1010 nm hasta los 1310 nm aproximadamente, permitiendo el paso de la luz obtenida de la EL en las células fotovoltaicas de silicio, cuyo pico se encuentra en los 1150 nm.

Este filtro tiene una forma circular, cuyas dimensiones son 30 mm de diámetro por 1.1 mm de grosor.

El uso de este tipo de accesorios resulta de gran interés, ya que impide que la cámara sea sensible a rangos del espectro que podrían provocar la pérdida de calidad en la EL debido a interferencias, así como también permiten obtener una imagen “pura” de la electroluminiscencia, sin necesitar el uso de softwares externos para sustraer el resto del espectro que recogen las cámaras comerciales, es decir, se ve directamente la EL.

Para acoplar el filtro a la lente se ha utilizado una carcasa personalizada construida a través de una impresora 3D.

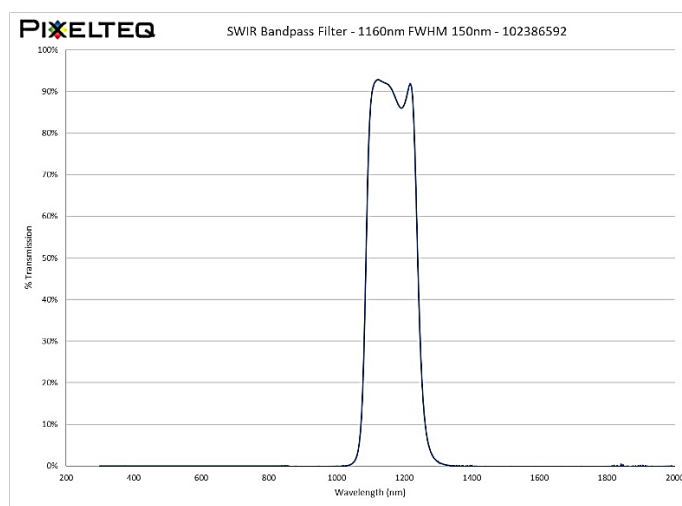


Figura 12: Rango del espectro electromagnético capaz de atravesar el filtro pasabanda (Fuente: Datasheet del fabricante [15] ).

- **Soporte para la cámara:** Para la sujeción de las cámaras a la hora de tomar las imágenes se han utilizado dos soportes realizados a través de una impresora 3D, uno para la cámara de la Raspberry Pi y otro para la cámara de InGaAs. Estos soportes han permitido sustentar las cámaras con la quietud necesaria

para la toma de imágenes de EL, las cuales requieren grandes tiempos de exposición.

- **Fuente de alimentación:** La fuente de alimentación que se ha empleado ha sido el modelo 1585 de la compañía Peak Tech, la cual es capaz de suministrar un voltaje en corriente continua entre 1 y 60 V, y una corriente entre los 0 y 15 A, rangos más que suficientes para realizar la parte experimental de este trabajo.

La ficha técnica de este dispositivo se encuentra en el Anexo VII de este trabajo.

- **Cámara de InGaAs y lente de la cámara InGaAs:** El dispositivo que se ha empleado ha sido la cámara con sensor basado en semiconductores de InGaAs, C127 41-03 de la compañía HAMAMATSU cuyas características principales son su alta sensibilidad al infrarrojo cercano, desde los 950 nm hasta los 1700 nm, así como una resolución de 640 x 512 píxeles.

La lente que se ha empleado en esta cámara ha sido la lente “HR975NCN-3H” de la compañía Kowa, entre cuyas características principales se encuentran una distancia focal de 8 mm y un número “f” de 1.4.

Las fichas técnicas de esta cámara y lente se encuentran en los Anexos VIII y IX respectivamente.

- **Célula solar fotovoltaica:** Para la realización de este estudio se han empleado tres células de silicio policristalino de la empresa MOTTECH, concretamente el modelo IM156B4. Sus características principales son una eficiencia del 19 %, una potencia de 4,67 W, una corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de 8.99 A y una tensión a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de 0.645 V.

La ficha técnica de estas células se encuentra en el Anexo X.

- **Conjunto final:** El exterior del conjunto final de los elementos utilizados para la toma de imágenes de EL puede observarse en la Figura 13. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, así como las partes que lo componen. Otros elementos que no se aprecian a simple vista y que también forman parte del conjunto final serían la lente, el filtro, la pirámide negra y la célula solar fotovoltaica.

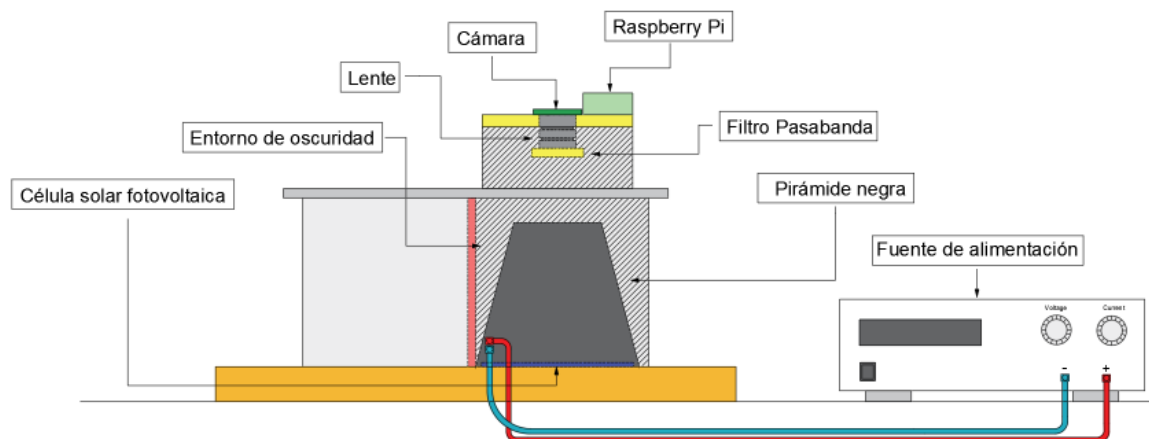


Figura 13: Ilustración del conjunto final con sus partes indicadas (Fuente: Elaboración propia).

## 3.2. METODOLOGÍA

Este apartado de metodología se ha dividido en tres subapartados donde se analizan las características o parámetros a la hora de realizar las mediciones que se han considerado como básicas, las modificaciones necesarias en dispositivos, así como la estrategia seguida a la hora de realizar la toma de imágenes.

### 3.2.1. CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS

Para la realización de la parte experimental se han tomado unos parámetros base con el objetivo de poder comparar de forma objetiva las imágenes obtenidas, como una temperatura de entre 20 °C y 30 °C, una  $I_{sc}$  de las células fotovoltaicas de 8.99 A, empleando este valor siguiendo las recomendaciones del IEC TS 60904, así como también se ha fijado en el software de adquisición de las imágenes un tiempo de exposición de 12.5 segundos, analizado más detalladamente en el Anexo I, una ganancia analógica de 1 y un balance de color también de 1 en los canales rojo, verde y azul (RGB). Si la cámara se dejara en modo automático, calcularía distintas ganancias según las condiciones que detectase debido a sus propios algoritmos internos.

Además, se han desactivado las opciones de enfoque digital (sharpening) y de eliminación digital de ruido (denoise). Con la fijación de estos parámetros se pretende extraer la imagen más bruta posible, es decir con el menor postprocesamiento por parte del software interno.

### 3.2.2. MODIFICACIONES Y DISPOSITIVOS

Además del ensamblaje y la creación de varios dispositivos, como son los soportes de las cámaras, el entorno de oscuridad, el filtro o la pirámide negra, ha sido necesario extraer el filtro IR de la cámara comercial “Raspberry Pi High Quality Camera”.

La extracción de este filtro permite incrementar la sensibilidad de la cámara comercial en el rango de emisiones de EL, ya que en el caso de que este no se removiese, impediría la captación del espectro emitido por las células solares fotovoltaicas de silicio, cercana a los 1150 nm [16].

A través de la Figura 14 puede observarse un gráfico que concatena la sensibilidad de los sensores CMOS y la emisión del espectro de las células de silicio (c-Si), así como la influencia de los filtros, siendo importante extraer el filtro IR que presenta la cámara comercial (área rosa), ya que como se observa bloquea la mayoría del área en la que la sensibilidad de sensor CMOS puede apreciar la emisión del c-Si. También se puede añadir un filtro pasabanda que bloquee la luz del espectro que no resulta de interés, con el objetivo de evitar la aparición de ruidos o interferencias indeseadas [17].

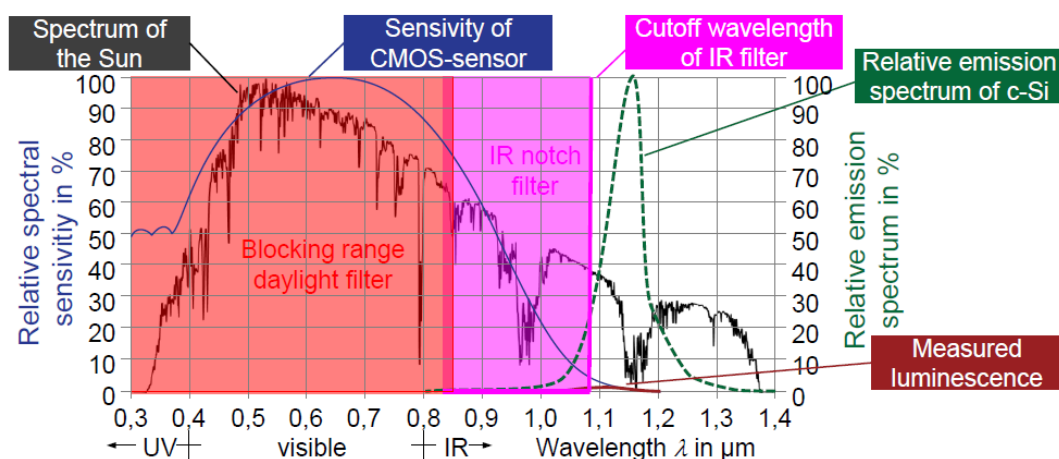


Figura 14: Rango de emisiones del espectro y el efecto del filtro IR (Fuente: Münster University of Applied Sciences).

### 3.2.3. ESTRATEGIA EN LA TOMA DE IMÁGENES

En primer lugar, se ha decidido realizar un estudio comparativo con diferentes tiempos de exposición para decidir cuál es el tiempo idóneo para conseguir una imagen de calidad sin utilizar un tiempo excesivo. Los tiempos que se han utilizado, iniciándose en

el segundo 1, tienen un incremento de 2,5 segundos por imagen hasta alcanzar los 20 segundos.

Una vez obtenido este valor del tiempo de exposición y con la  $I_{sc}$  de las células fotovoltaicas (8.99 A), se han tomado imágenes incorporando los distintos dispositivos externos que pueden emplearse para mejorar la EL, siendo en este caso el empleo de la pirámide negra y el filtro pasabanda, con el objetivo de analizar si la mejora en la EL es apreciable y significativa.

También se han comparado las imágenes obtenidas con la cámara de la Raspberry Pi modificada y la cámara de InGaAs, cuya sensibilidad en el rango de emisión de la célula solar fotovoltaica de silicio es mucho mayor (Figura 6).

Para cada caso se han tomado dos fotografías, una inyectando corriente y otra sin inyectar, con el objetivo de sustraer toda la radiación del espectro que no pertenece a la electroluminiscencia de la célula solar fotovoltaica. Esta operación se ha realizado a través del software “Fiji”, el cual es un paquete de procesamiento de imágenes con código abierto basado en “ImageJ2”.

Finalmente, se ha realizado una comparación de la técnica de electroluminiscencia variando la corriente que se inyecta a la célula, inyectándose inicialmente 6 A e incrementando este valor en 1 A por imagen hasta alcanzar los 12 A.

Con el objetivo de minimizar el error que pudiese aparecer en el experimento, se ha repetido todos los procesos anteriores en 3 células de silicio policristalino distintas.



## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 4.1. VARIACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

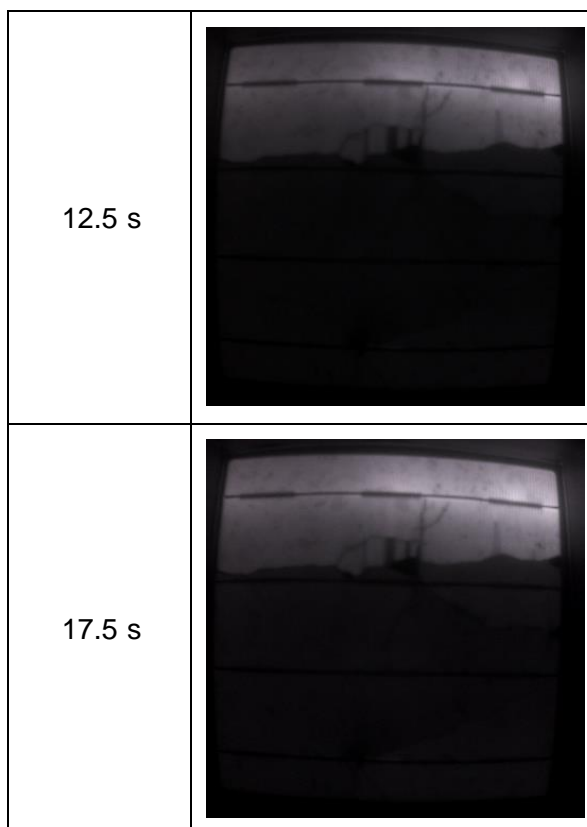
Como se ha analizado en el Anexo I con mayor profundidad, el tiempo de exposición es un parámetro de gran influencia para la obtención de imágenes de EL con una cámara con un sensor de silicio.

Resultado de este análisis, se ha considerado que la relación entre el tiempo de exposición y la luminosidad captada por el sensor se mantiene proporcional aproximadamente hasta los 12.5 segundos, tiempo a partir del cual el incremento del tiempo de exposición no resulta en imágenes de mayor calidad, si no que provoca la aparición de brillos alrededor de determinados puntos de soldadura por los cuales circula una mayor densidad de corriente, generando una mayor EL.

Tabla 2: Fotografías de la célula III tras la realización de EL variando el tiempo de exposición (Fuente: Elaboración propia).

| Tiempo de exposición | Célula III                                                                           |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.5 s                |  |
| 7.5 s                |  |





Un análisis más detallado, así como el resto de fotografías tomadas pueden observarse en el Anexo I.

## 4.2. PROGRESIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Como ha sucedido con el apartado anterior, este análisis se ha realizado con mayor profundidad en el Anexo II, a través del cual se han obtenido las siguientes conclusiones.

La aplicación de la pirámide, aunque no haya afectado notablemente a las imágenes resultantes de EL, si ha permitido apreciar que gracias a su aplicación la cantidad de luz que accede al entorno de oscuridad es menor, así como también modifica los reflejos ocasionados por la pasta de soldadura flux.

Para la obtención de una imagen clara de EL sin la aplicación del filtro pasabanda es necesaria la toma de dos fotografías, una inyectando corriente a la célula y otra sin inyectar, para posteriormente procesar ambas en un software.

Cuando se incluye el filtro pasabanda se observa una imagen resultante de EL menos nítida que cuando este no se incluye, probablemente debido a que aunque deja pasar

el pico de emisión del espectro emitido por la célula, también filtra gran parte de la luz que es capaz de recibir el sensor de la cámara de silicio.

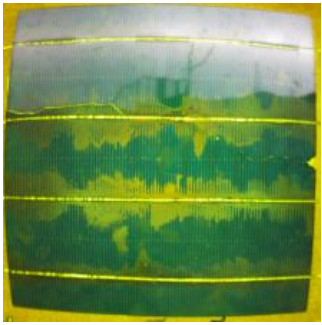
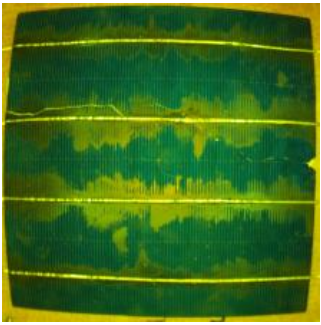
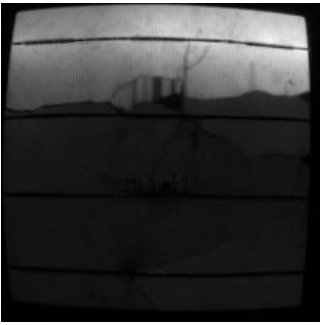
Una solución a este problema sería fabricar un filtro específico que permita el paso desde los 800 nm a los 1200 nm, ya que aproximadamente este es el rango en el que se cruzan la emisión de EL de las células fotovoltaicas de silicio y la sensibilidad de las cámaras de silicio. Esta solución incrementaría bastante el coste, ya que sería necesario realizar un filtro pasabanda personalizado.

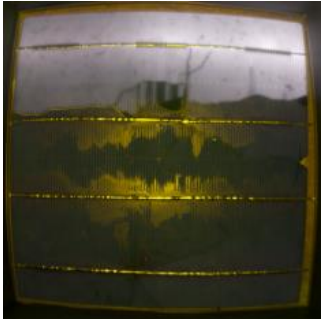
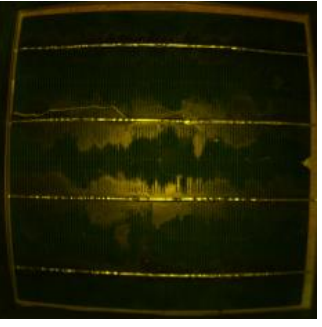
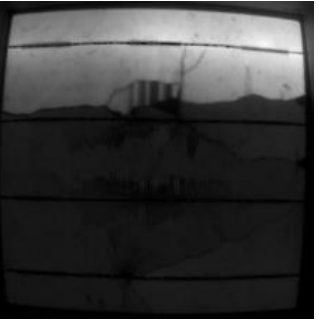






La principal ventaja del uso de este filtro pasabanda es que este muestra directamente una imagen de EL, por lo que no requiere de un procesamiento con software como en los casos anteriores. Es por esto que la fotografía de la célula a la que se le inyecta corriente y la imagen resultante tras realizar la sustracción no presentan cambios significativos.

Además, se ha observado que cuando se aplica el filtro pasabanda se reducen los reflejos y sombras producidas por la pasta flux de soldadura, las cuales se aprecian en las fotografías sin dicho filtro.

Tampoco se ha apreciado variación entre la aplicación de únicamente el filtro pasabanda y la aplicación conjunta del filtro y la pirámide, probablemente como resultado de que el filtro bloquea gran parte de la emisión que podría generar interferencias en la EL.

Tabla 3: Imágenes de la Célula III inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia).

| CÉLULA III |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            | Con Corriente                                                                       | Sin Corriente                                                                        | Resultado                                                                             |
| Sin Nada   |  |  |  |

|                         |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Con Pirámide            |    |    |    |
| Con el Filtro Pasabanda |    |    |    |
| Pirámide y Filtro       |  |  |  |

Un análisis más detallado, así como el resto de las fotografías tomadas, pueden observarse en el Anexo II.

### 4.3. VARIACIÓN DE LA CORRIENTE

Tras la realización de un análisis detallado en el Anexo III, se han obtenido como resultado las siguientes conclusiones.

En las células puede observarse, a través de las fotografías tomadas con la cámara de silicio, como el incremento de la intensidad se encuentra proporcionalmente relacionado con la EL emitida por la célula solar fotovoltaica, ya que se puede observar una


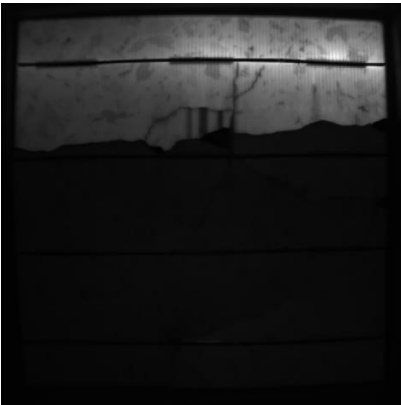
diferencia notoria entre las imágenes tomadas inyectando 6 A y 12 A, emitiendo mayor EL la fotografía tomada a 12 A de flujo de corriente.

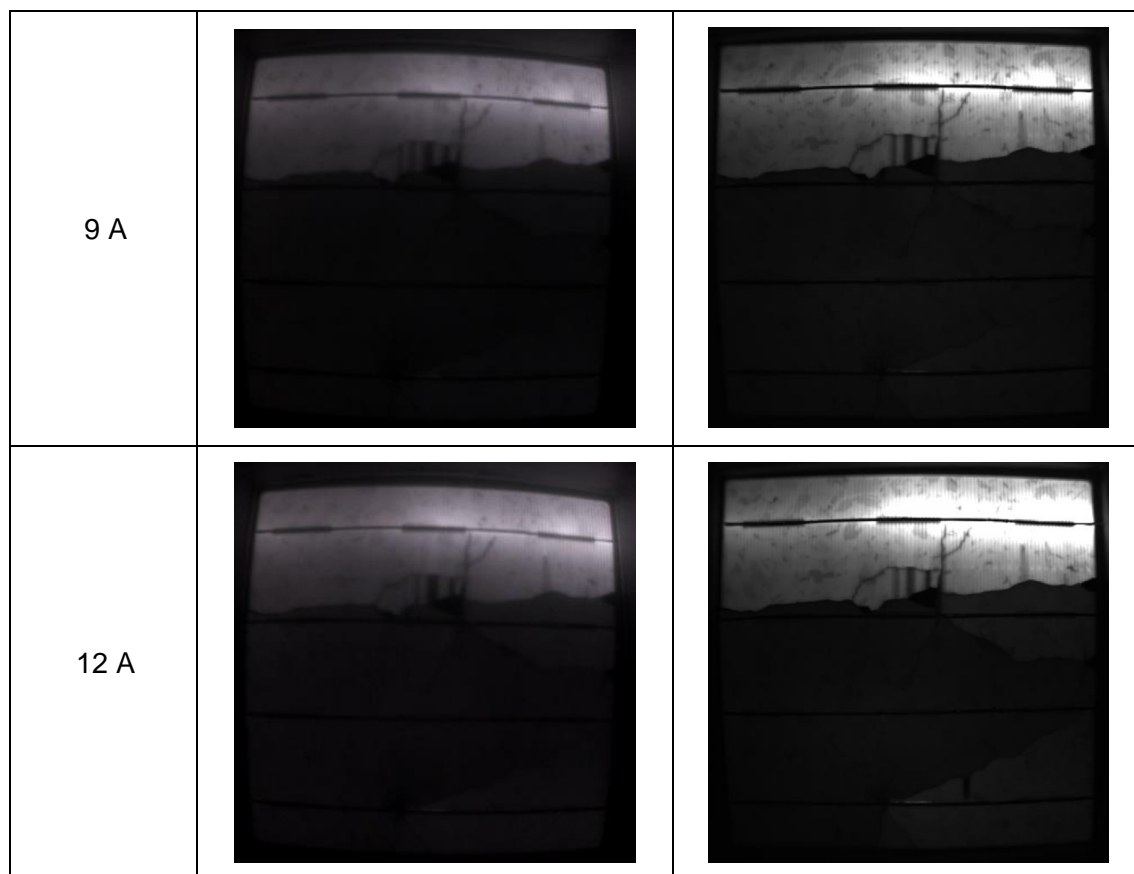
Sin embargo, este incremento de la luminosidad no se aprecia con tanta claridad en la cámara de InGaAs, ya que su mayor sensibilidad al espectro de emisión permite que incluso las imágenes tomadas con 6 A sean claras y nítidas.

Un fenómeno que sí que se aprecia en las imágenes tomadas por ambas cámaras es la aparición de brillos en determinados puntos de los bus bar de las células, siendo estos provocados por un mejor contacto eléctrico en estas zonas en comparación con el resto del área, resultando en una mayor densidad de corriente en estos puntos, desencadenando una mayor recombinación y, consecuentemente, EL.

Además, también se ha podido comprobar como ambas técnicas de EL han sido capaces de apreciar las roturas presentes en las células, siendo esto más notorio en las imágenes tomadas a la célula III, que presenta tanto cracks perpendiculares como paralelos a los bus bars.

Tabla 4: Fotografías de la célula III inyectando 6,9 y 12 A con la cámara RPI y la cámara de InGaAs (Fuente: Elaboración propia).

| Intensidad | Célula III RPI                                                                      | Célula III InGaAs                                                                    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 A        |  |  |



El resto de las imágenes tomadas, así como el análisis individual de cada célula se encuentra en el Anexo III.

## 5. CONCLUSIONES

La técnica de la electroluminiscencia, especialmente ahora que la energía fotovoltaica se encuentra en auge, resulta muy interesante como método de detección de defectos en módulos y células solares fotovoltaicas, ya que aunque requiere de una fuente de alimentación externa, se trata de un método rápido y preciso capaz de dar un diagnóstico fiable de la situación del módulo o célula.

Las cámaras de InGaAs o de germanio que se emplean para realizar electroluminiscencia profesionalmente presentan un alto coste, lo que dificulta en gran medida la propagación de esta técnica en el mercado.

Como solución a este problema se ha analizado la capacidad de las cámaras comerciales de silicio a la hora de realizar EL, dando como resultado que si son capaces de realizar este método de detección de fallos siempre y cuando se le remueva el filtro IR que la gran mayoría presentan por defecto.

Se ha comprobado que la aplicación de dispositivos como la pirámide negra o el filtro pasabanda pueden mejorar la calidad de las imágenes, siendo la influencia de la pirámide más leve, ya que aunque reduzca la cantidad de luz que llega a la célula, en las imágenes resultantes su aplicación no genera cambios significativos.

Sin embargo, cuando se aplica el filtro pasabanda se ha detectado una pérdida en la nitidez de la imagen, aunque ofrece las ventajas de evitar los reflejos ocasionados por la pasta de soldadura flux, así como la obtención de una imagen de EL de forma directa, sin requerir un procesamiento externo por software.

Las imágenes obtenidas se han comparado con las imágenes tomadas con una cámara de InGaAs, las cuales han sido de mayor calidad debido a su mayor sensibilidad al espectro de emisión de las células de silicio. Aun así se ha podido comprobar que a través de la cámara modificada se puede realizar un diagnóstico de la célula de gran fiabilidad.

También se ha analizado la importancia del tiempo de exposición y la corriente que se inyecta en la célula, dando como conclusión que la emisión de EL se incrementará cuanto mayor sean estos valores, aunque esta relación proporcional deja de ser beneficiosa con valores muy altos, ya que aparecen ciertos brillos debidos a una mayor densidad de corriente en la zona.

El tiempo de exposición idóneo se ha considerado de 12.5 segundos, mientras que la corriente utilizada ha sido de 9 A debido a las recomendaciones del IEC TS 60904.

## 6. NOMENCLATURA

**EI:** Electroluminiscencia

**FV:** Fotovoltaico

**InGaAs:** Indio-Galio-Arsénico

**String:** Conjunto de módulos fotovoltaicos conectados en serie.

**Fingers:** Los fingers son parte de la malla metálica de la célula solar fotovoltaica que recolectan los electrones generados y los transmiten a filamentos metálicos de mayor grosor, los bus bar.

**IR:** Infrarrojo

**I<sub>sc</sub>:** Corriente de cortocircuito

**V<sub>oc</sub>:** Voltaje a circuito abierto



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] REN21, “Renewables 2021 Global Status Report,” Paris, 2021.
- [2] “Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 - Agenda 2030.” <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm> (accessed Jun. 26, 2022).
- [3] M. Victoria *et al.*, “Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future,” *Joule*, vol. 5, no. 5. Cell Press, pp. 1041–1056, May 19, 2021. doi: 10.1016/j.joule.2021.03.005.
- [4] wwwreees, “Informe del Sistema Eléctrico Español 2020.” 2020. [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/glosario>
- [5] “VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO GOBIERNO DE ESPAÑA.” [Online]. Available: [www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es)
- [6] “La potencia instalada de solar fotovoltaica en España aumenta casi un 30% en 2021 | Red Eléctrica.” <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2022/03/potencia-instalada-solar-fotovoltaica-en-espana-aumenta-casi-un-30-por-ciento-en-2021> (accessed Jun. 23, 2022).
- [7] L. Lillo-Sánchez, G. López-Lara, J. Vera-Medina, E. Pérez-Aparicio, and I. Lillo-Bravo, “Degradation analysis of photovoltaic modules after operating for 22 years. A case study with comparisons,” *Solar Energy*, vol. 222, pp. 84–94, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.04.026.
- [8] T. Fuyuki and A. Kitiyanan, “Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 96, no. 1, pp. 189–196, Jul. 2009, doi: 10.1007/s00339-008-4986-0.
- [9] “Los Semiconductores Aprende Facil.” <https://www.areatecnologia.com/TUTORIALES/SEMICONDUCTORES.htm> (accessed Jun. 23, 2022).
- [10] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME, “Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications,” 2018.
- [11] International Electrotechnical Commission, *IEC TS 60904-13-2018*. 2018.
- [12] “Distancia Focal: Explicación Simplificada [Con Ejemplos].” [https://www.blogdelfotografo.com/distancia-focal/#Que\\_es\\_la\\_distancia\\_focal](https://www.blogdelfotografo.com/distancia-focal/#Que_es_la_distancia_focal) (accessed Jun. 23, 2022).
- [13] “What is Aperture? Understanding Aperture in Photography.” <https://photographylife.com/what-is-aperture-in-photography> (accessed Jun. 23, 2022).
- [14] S. and M.-A. J. I. and A.-G. V. and P. A. R. and M. D. F. Hernández-Callejo Luis and Gallardo-Saavedra, “Methodology for Inspection of Defects in Photovoltaic Plants by Drone and Electroluminescence,” in *Smart Cities*, 2022, pp. 3–14.

- [15] “SWIR Bandpass Filter - 1160nm FWHM 150nm - Optical Filter Shop.”  
<https://opticalfiltershop.com/shop/bandpass-filter/swir-bandpass-filters-1-1um-to-3-0um/swir-bandpass-filter-1160nm-fwhm-150nm/> (accessed Jul. 02, 2022).
- [16] A. Petraglia and V. Nardone, “Electroluminescence in photovoltaic cell,” *Phys Educ*, vol. 46, no. 5, pp. 511–513, Sep. 2011, doi: 10.1088/0031-9120/46/5/F01.
- [17] K. Mertens, H. Kösters, and M. Diehl, “Cost-efficient extensive On-Site Quality Analysis of Solar Modules.”

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Potencia fotovoltaica instalada global del 2010-2020 (Fuente: Instituto Becquerel y IEA PVPS).....                                                     | 3  |
| Figura 2: Potencia eléctrica renovable por tecnología 2005-2019 (Fuente: MITERD)...                                                                              | 4  |
| Figura 3: Evolución de la potencia instalada fotovoltaica en MW en España (Fuente: Red Eléctrica de España).....                                                 | 5  |
| Figura 4: Esquema funcionamiento unión PN (Fuente: Elaboración propia).....                                                                                      | 6  |
| Figura 5: Respuesta espectral absoluta según el material semiconductor del detector (Fuente: IEC TS 60904). ....                                                 | 8  |
| Figura 6: Emisión espectral de la electroluminiscencia de (a) Silicio, (b) ZnO/ CdS/ Cu (In,Ga)Se <sub>2</sub> (CIGS) y (c) CdS/CdTe (Fuente: IEC TS 60904)..... | 9  |
| Figura 7: Relación entre la distancia focal y el ángulo de visión (Fuente: DarkRoom) .                                                                           | 10 |
| Figura 8: Relación entre el número f y la apertura del diafragma (Fuente: AulaClic). ..                                                                          | 11 |
| Figura 9: Tiempo requerido para realizar electroluminiscencia con dron o con soporte fijo según la potencia nominal instalada (Fuente: IEA). ....                | 14 |
| Figura 10: Cracks perpendiculares a los bus bars (Fuente: IEC TS 60904 - 13:2018).                                                                               | 15 |
| Figura 11: Rango del espectro electromagnético capaz de atravesar el filtro pasabanda (Fuente: Datasheet del fabricante [15] ). ....                             | 17 |
| Figura 12: Ilustración del conjunto final con sus partes indicadas (Fuente: Elaboración propia).....                                                             | 19 |
| Figura 13: Rango de emisiones del espectro y el efecto del filtro IR (Fuente: Münster University of Applied Sciences). ....                                      | 20 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Tipos de cámaras de EL y sus parámetros característicos (Fuente: IEA).....                                                                                                   | 8  |
| Tabla 2: Fotografías de la célula III tras la realización de EL variando el tiempo de exposición (Fuente: Elaboración propia). ....                                                   | 22 |
| Tabla 3: Imágenes de la Célula III inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia)..... | 24 |
| Tabla 4: Fotografías de la célula III inyectando 6,9 y 12 A con la cámara RPI y la cámara de InGaAs (Fuente: Elaboración propia).....                                                 | 26 |

**ANEXO I:**  
**VARIACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN**

# ÍNDICE

## ANEXO I: VARIACIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

|    |                                       |   |
|----|---------------------------------------|---|
| 1. | INTRODUCCIÓN .....                    | 1 |
| 2. | ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES TOMADAS..... | 2 |
| 3. | CONCLUSIONES .....                    | 5 |

# 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los parámetros de mayor importancia a la hora de realizar EL con una cámara de silicio es el tiempo durante el cual el sensor se encuentra expuesto a los fotones, a este parámetro se le conoce como tiempo de exposición.

En una cámara de InGaAs, cuya sensibilidad es mayor en la emisión de EL, los tiempos de exposición son muy reducidos, del orden de los milisegundos, mientras que en el caso de las cámaras de silicio, los tiempos de exposición requeridos para obtener una imagen de EL son bastante superiores, requiriendo varios segundos.

El objetivo de este anexo es comprobar como afecta el incremento del tiempo de exposición a las EL resultantes, inyectando a las células una corriente de 9 A (la intensidad nominal de estas).

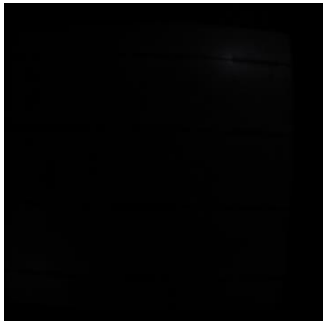


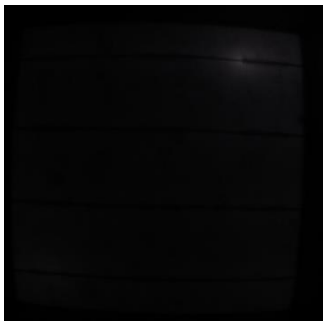

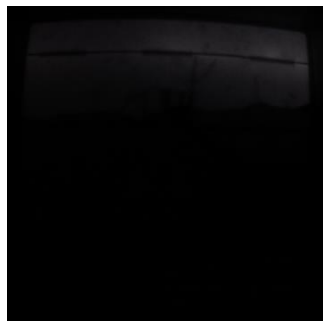
## 2. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES TOMADAS

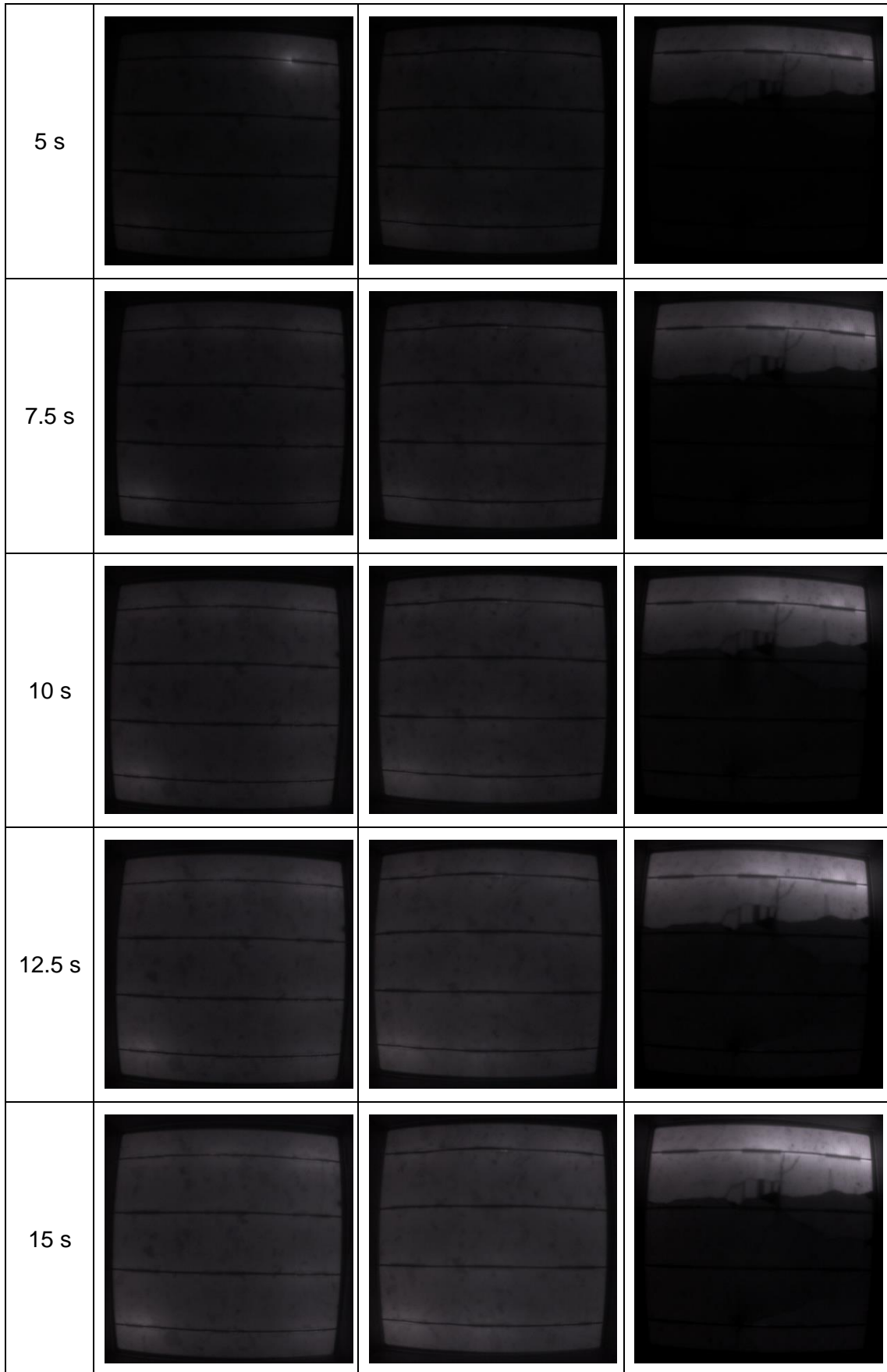
Cuando el tiempo de exposición es muy bajo, inferior a los 5 segundos, las imágenes no se aprecian con suficiente claridad, únicamente observándose ciertos brillos en diferentes puntos de las soldaduras debidos a un mejor contacto eléctrico en esa zona.

A partir de los 5 segundos ya es apreciable la totalidad del área funcional de la célula solar fotovoltaica, aunque no es hasta los 10 segundos de tiempo de exposición que la imagen de EL no presenta una calidad que permita apreciar adecuadamente los defectos de las células.

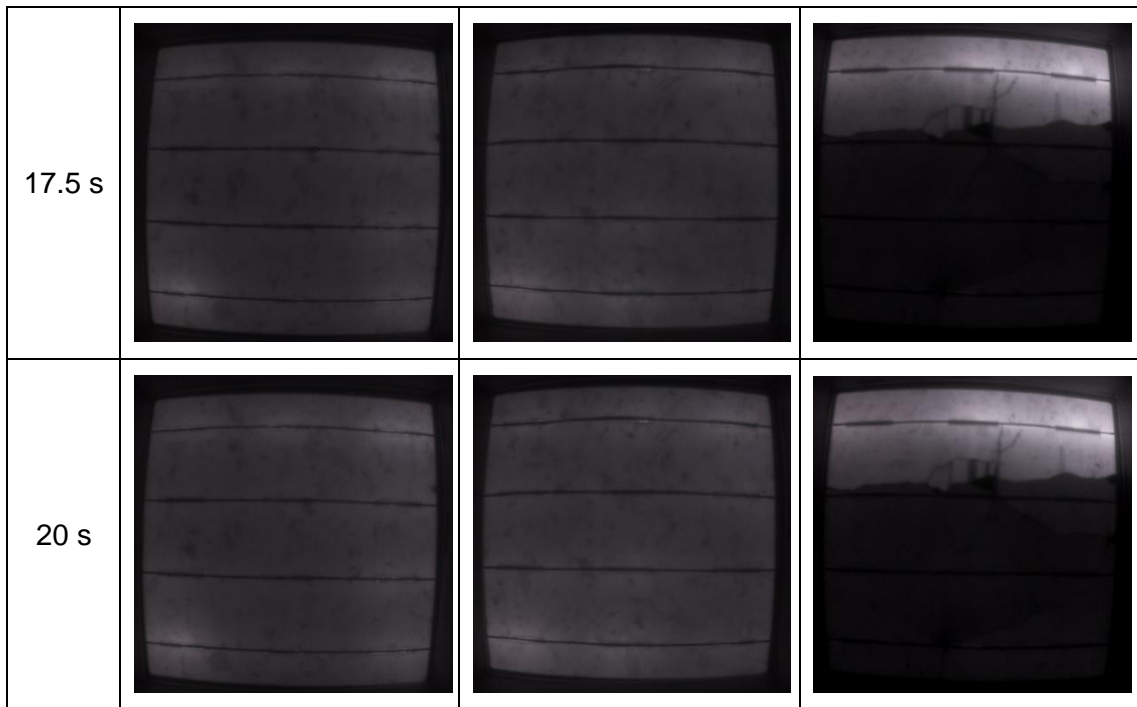
Las fotografías tomadas con un tiempo de exposición mayor a 10 segundos presentan un breve incremento en la luminosidad de la imagen, siendo esta mejora poco notoria tras superar los 12.5 segundos, motivo por el que se ha tomado este tiempo como referencia para la toma de imágenes, ya que aunque al incrementar el tiempo se nota una reducida mejora en la luminosidad, también se observa una mayor aparición de brillos en los puntos de soldadura.

Tabla 1: Comparación de fotografías de EL de tres células a diferentes tiempos de exposición (Fuente: Elaboración propia).

| Tiempo de exposición | Célula I                                                                            | Célula II                                                                            | Célula III                                                                            |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 s                  |  |  |  |
| 2.5 s                |  |  |  |







### **3. CONCLUSIONES**

La relación entre el tiempo de exposición y la luminosidad captada por el sensor es proporcional aproximadamente hasta los 12.5 segundos, tiempo a partir del cual el incremento del tiempo de exposición no resulta en imágenes de mayor calidad, si no que provoca la aparición de brillos alrededor de determinados puntos de soldadura por los cuales circula una mayor densidad de corriente, generando una mayor EL.

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                  |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Tabla 1: Comparación de fotografías de EL de tres células a diferentes tiempos de exposición (Fuente: Elaboración propia). ..... | 2 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

## **ANEXO II:**

### **PROGRESIÓN DE LOS DISPOSITIVOS**

# ÍNDICE

## ANEXO II: PROGRESIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

|                                                  |   |
|--------------------------------------------------|---|
| 1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                     | 1 |
| 2. <b>ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES TOMADAS</b> ..... | 2 |
| 2.1. IMÁGENES TOMADAS .....                      | 2 |
| 2.1.1. CÉLULA I.....                             | 2 |
| 2.1.2. CÉLULA II.....                            | 4 |
| 2.1.3. CÉLULA III.....                           | 5 |
| 3. <b>CONCLUSIONES</b> .....                     | 7 |

# 1. INTRODUCCIÓN

Para poder realizar la técnica de electroluminiscencia a través de una cámara comercial ha sido necesario modificar el dispositivo, extrayendo el filtro IR que presentan por defecto este tipo de dispositivos, pues su presencia bloquea la luz emitida por la EL.

Una vez extraído este filtro se han tomado varias fotografías con diferentes dispositivos y mejoras, descritos con mayor detalle en el apartado 3 de la Memoria, con el objetivo de poder apreciar una mejora significativa en las imágenes resultantes.

Las imágenes han sido tomadas con un tiempo de exposición de 12.5 segundos, y una corriente de 9 A.

Además, estas fotografías se han procesado a través del software Fiji, restando dos imágenes, una en la que se inyecta corriente a la célula, y por lo tanto emite EL, y la otra sin inyectar corriente, esto con el objetivo de eliminar las interferencias que pueden aparecer debido a la entrada de luz en el entorno de oscuridad.

## **2. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES TOMADAS**

### **2.1. IMÁGENES TOMADAS**

#### **2.1.1. CÉLULA I**

Comparando las imágenes tomadas a la Célula I, puede observarse que entre las fotografías de la célula sola y la célula con la pirámide no ocurre un cambio notable entre los resultados, aunque si que se observa como la luz que accede al entorno de oscuridad es menor cuando se incluye la pirámide negra.

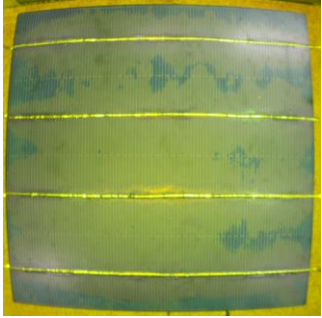
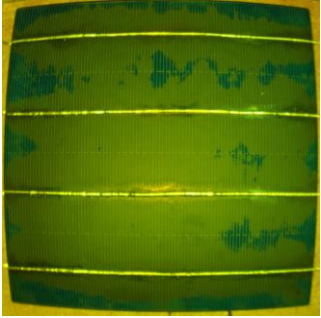
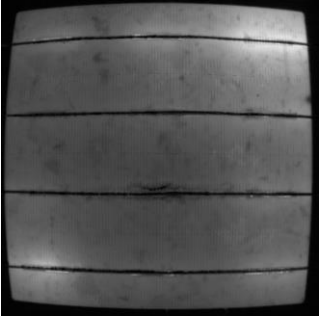
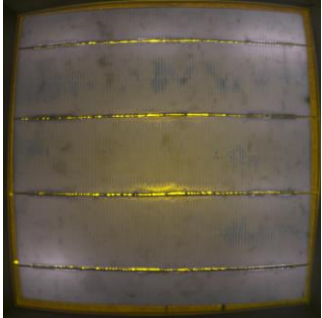
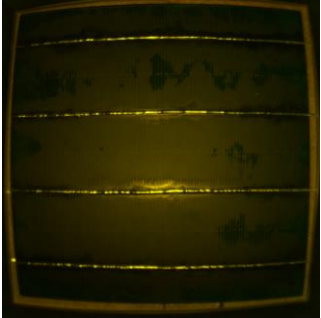
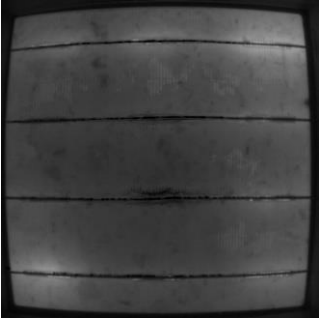
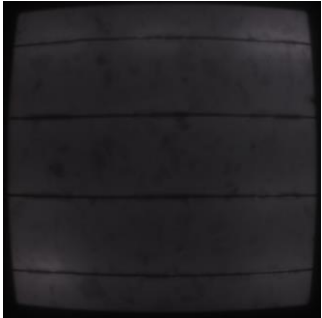
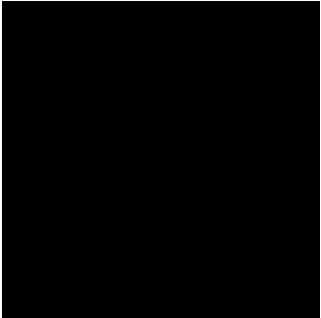
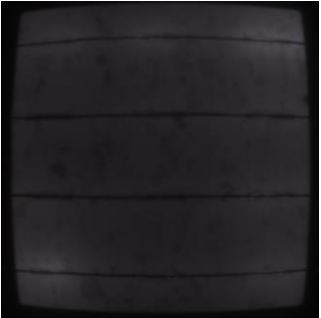
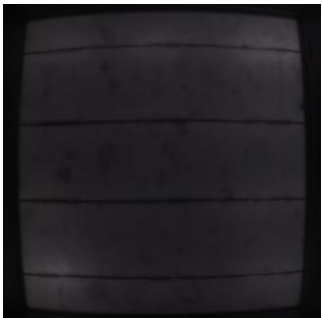
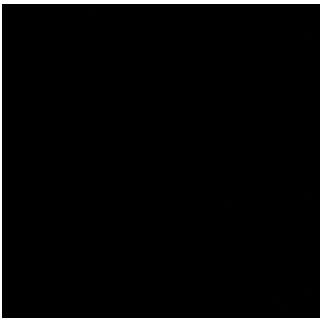

Cuando se incluye el filtro pasabanda se observa una imagen de EL resultante menos nítida que cuando este no se incluye, probablemente debido a que aunque deja pasar el pico de emisión del espectro emitido por la célula, también filtra parte de la luz emitida.

La principal ventaja del uso de este filtro pasabanda es que este muestra directamente una imagen de EL, por lo que no requiere de un procesamiento con software como en los casos anterior. Es por esto que la fotografía de la célula a la que se le inyecta corriente, y la imagen resultante tras realizar la sustracción no presentan cambios significativos.

Además, se ha observado que cuando se aplica el filtro pasabanda se reducen los reflejos y sombras producidas por la pasta flux de soldadura, las cuales se aprecian en las fotografías previas a aplicar el filtro.

Tampoco se ha apreciado variación entre la aplicación de únicamente el filtro pasabanda y la aplicación del filtro y la pirámide, probablemente como resultado de que el filtro bloquea gran parte de la emisión que podría generar interferencias en la EL.

Tabla 1: Imágenes de la Célula I inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia).

| CÉLULA I                |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | Con Corriente                                                                       | Sin Corriente                                                                        | Resultado                                                                             |
| Sin Nada                |    |    |    |
| Con Pirámide            |   |   |   |
| Con el Filtro Pasabanda |  |  |  |
| Pirámide y Filtro       |  |  |  |

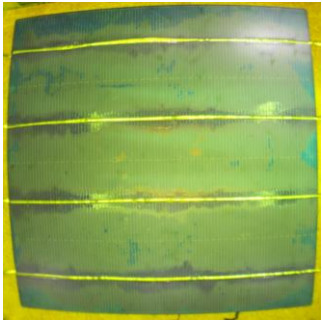
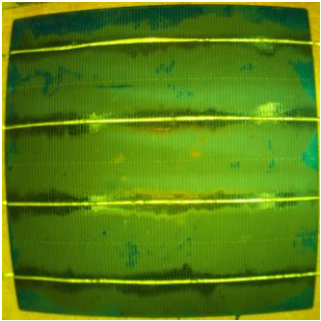
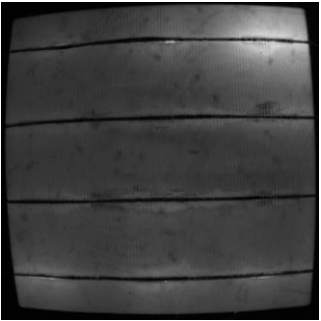
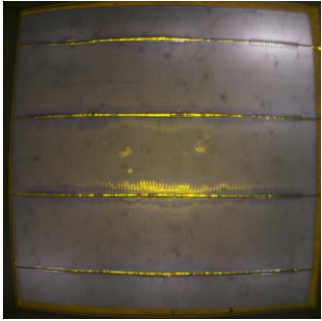
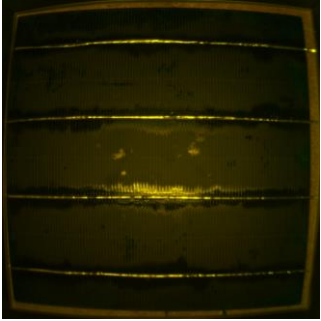
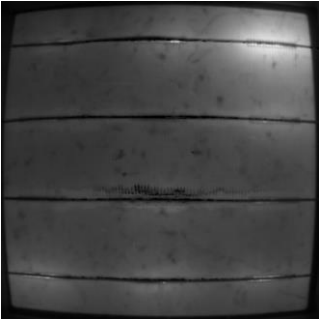


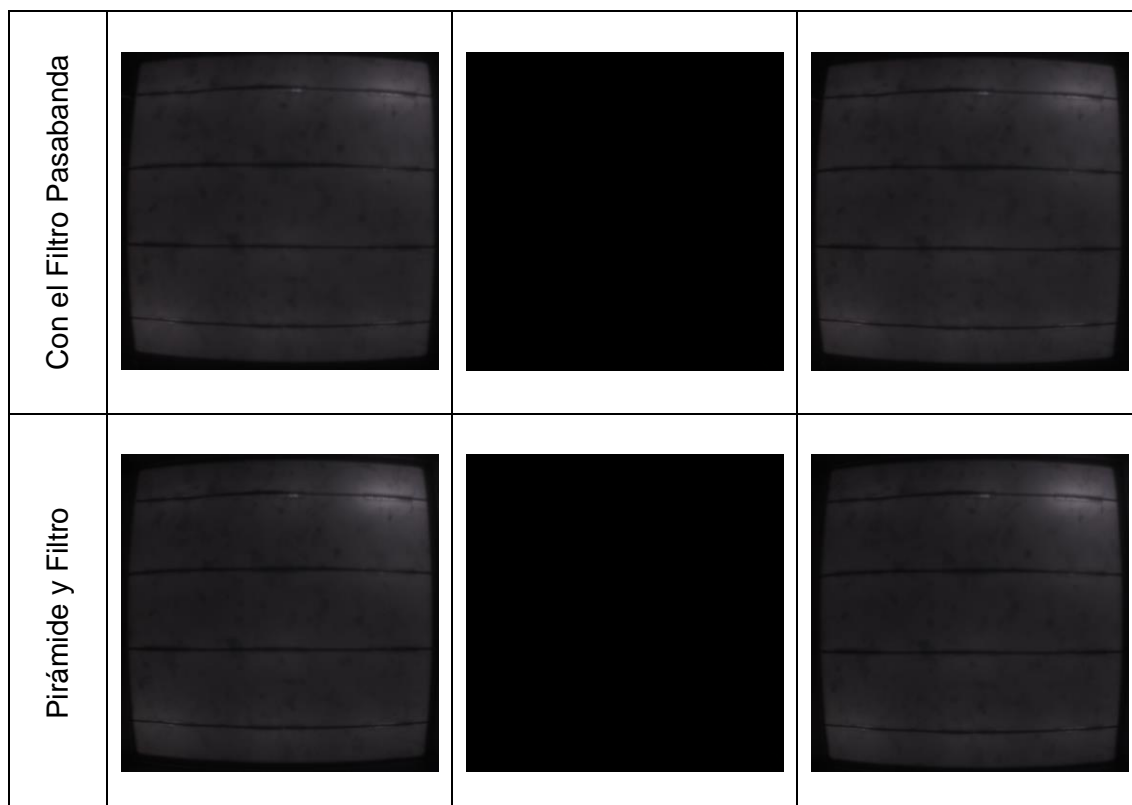
## 2.1.2. CÉLULA II

Las fotografías de la Célula II presentan características similares a las obtenidas con la Célula I, no habiendo grandes diferencias entre hacer la EL sin nada o incluyendo la pirámide, únicamente un cambio en la disposición de los reflejos resultantes por la pasta flux de soldadura, presentando con la pirámide un único reflejo central, mientras que sin nada se observan cuatro reflejos más distribuidos.

Al igual que pasaba en la Célula I, cuando se aplica el filtro pasabanda a lente de la cámara esta pierde nitidez, pero deja de apreciar los reflejos previamente mencionados, así como tampoco necesita un procesamiento software para apreciar la EL.

Tabla 2: Imágenes de la Célula II inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia).

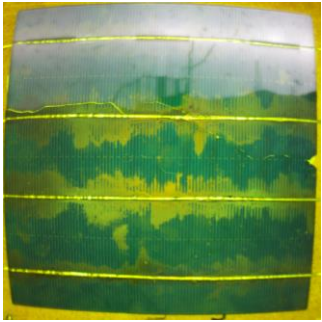
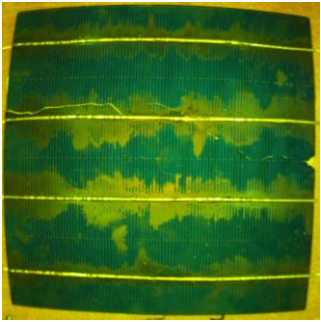
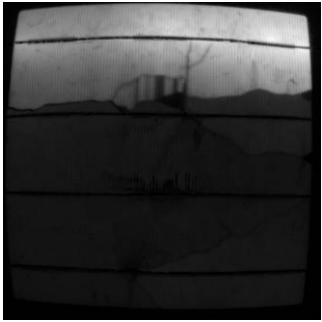
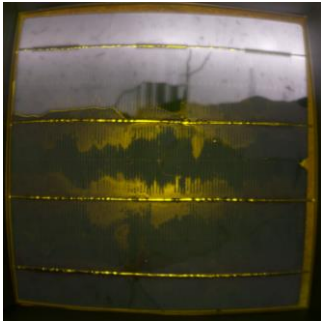
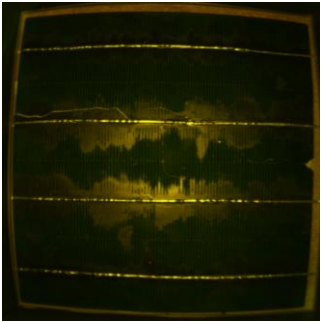
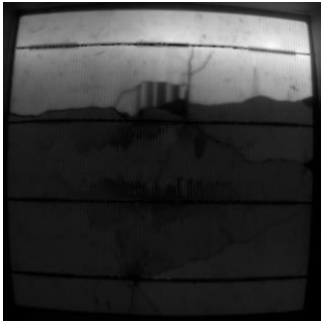

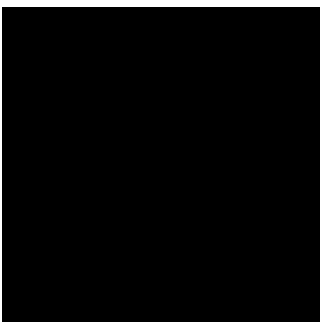


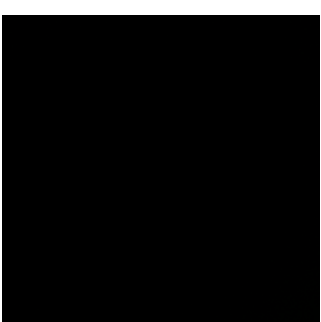

| CÉLULA II    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Con Corriente                                                                       | Sin Corriente                                                                        | Resultado                                                                             |
| Sin Nada     |  |  |  |
| Con Pirámide |  |  |  |



### 2.1.3. CÉLULA III

Como ha resultado con las células anteriores, la aplicación del filtro pasabanda ha sido la aplicación más notoria en la EL, ya que además de las características previamente mencionadas en los apartados anteriores, se puede apreciar como la aplicación del filtro reduce la cantidad de luz recibida por la cámara, provocando que la parte inferior al crack apenas sea visible cuando se aplica el filtro, a diferencia de cuando este no se aplica, que si se puede apreciar el área completa de la célula.

Tabla 3:: Imágenes de la Célula III inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia).

| CÉLULA III              |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | Con Corriente                                                                       | Sin Corriente                                                                        | Resultado                                                                             |
| Sin Nada                |    |    |    |
| Con Pirámide            |   |   |   |
| Con el Filtro Pasabanda |  |  |  |
| Pirámide y Filtro       |  |  |  |

### 3. CONCLUSIONES

La aplicación de la pirámide, aunque no haya afectado notablemente las imágenes resultantes de EL, si ha permitido apreciar que gracias a su aplicación la cantidad de luz que accede al entorno de oscuridad es menor, así como también modifica los reflejos ocasionados por la pasta de soldadura flux.

Para la obtención de una imagen clara de EL sin la aplicación del filtro pasabanda es necesaria la toma de dos fotografías, una inyectando corriente a la célula y otra sin inyectar, para posteriormente procesar ambas en un software.

Cuando se incluye el filtro pasabanda se observa una imagen resultante de EL menos nítida que cuando este no se incluye, probablemente debido a que aunque deja pasar el pico de emisión del espectro emitido por la célula, también filtra gran parte de la luz que es capaz de recibir el sensor de la cámara de silicio.

Una solución a este problema sería fabricar un filtro específico que permita el paso desde los 800 nm a los 1200 nm, ya que aproximadamente este es el rango en el que se cruza la emisión de EL de las células fotovoltaicas de silicio y la sensibilidad de las cámaras de silicio. Esta solución incrementaría bastante el coste, ya que sería necesario realizar un filtro pasabanda personalizado.

La principal ventaja del uso de este filtro pasabanda es que este muestra directamente una imagen de EL, por lo que no requiere de un procesamiento con software como en los casos anteriores. Es por esto que la fotografía de la célula a la que se le inyecta corriente, y la imagen resultante tras realizar la sustracción no presentan cambios significativos.

Además, se ha observado que cuando se aplica el filtro pasabanda se reducen los reflejos y sombras producidas por la pasta flux de soldadura, las cuales se aprecian en las fotografías sin el filtro.

Tampoco se ha apreciado variación entre la aplicación de únicamente el filtro pasabanda y la aplicación del filtro y la pirámide, probablemente como resultado de que el filtro bloquea gran parte de la emisión que podría generar interferencias en la EL.

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                       |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Tabla 1: Imágenes de la Célula I inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia).....   | 3 |
| Tabla 2: Imágenes de la Célula II inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia).....  | 4 |
| Tabla 3: Imágenes de la Célula III inyectando y sin inyectar corriente, así como la imagen resultante de su sustracción con diferentes dispositivos (Fuente: Elaboración propia)..... | 6 |

**ANEXO III:**  
**VARIACIÓN DE LA CORRIENTE**

# ÍNDICE

## ANEXO III: VARIACIÓN DE LA CORRIENTE

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 1. EFECTO DE LA INTENSIDAD EN EL .....   | 1  |
| 2. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES TOMADAS..... | 2  |
| 2.1. IMÁGENES TOMADAS .....              | 2  |
| 2.1.1. CÉLULA I.....                     | 2  |
| 2.1.2. CÉLULA II.....                    | 5  |
| 2.1.3. CÉLULA III.....                   | 7  |
| 3. CONCLUSIONES .....                    | 10 |

# 1. EFECTO DE LA INTENSIDAD EN EL

La electroluminiscencia es una técnica de inspección ampliamente utilizada en el sector de la fotovoltaica para comprobar el estado de las células solares.

La calidad de la imagen resultante de la EL depende de varios factores, entre los cuales se encuentran la corriente inyectada en la célula, el tiempo de exposición de la imagen, el sensor utilizado y el ambiente de oscuridad en el que se sitúa la muestra a analizar.

En este anexo se ha analizado, a través de los parámetros y dispositivos mencionados previamente en la Memoria de este documento, la modificación de la luminosidad de tres células fotovoltaicas distintas gracias a la variación la corriente inyectada, comenzando en los 6 A y finalizando en los 12 A, con una progresión de 1 A entre imagen tomada.

Además, se ha comparado la diferencia entre las imágenes tomadas por la cámara de silicio adaptada, de menor sensibilidad a la emisión de EL, y la cámara de InGaAs, con alta sensibilidad en este rango.



## **2. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES TOMADAS**

### **2.1. IMÁGENES TOMADAS**

#### **2.1.1. CÉLULA I**


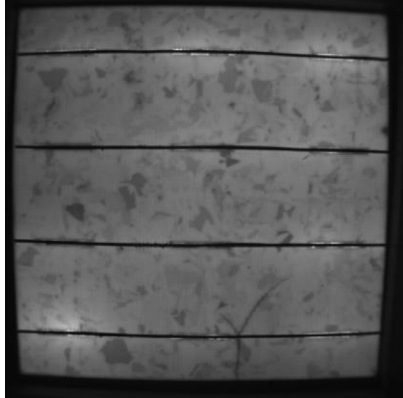
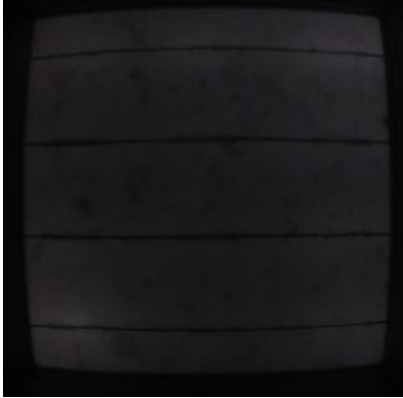
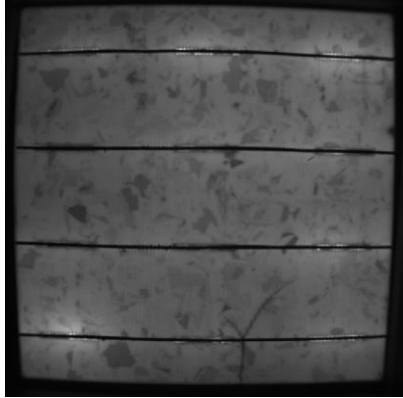
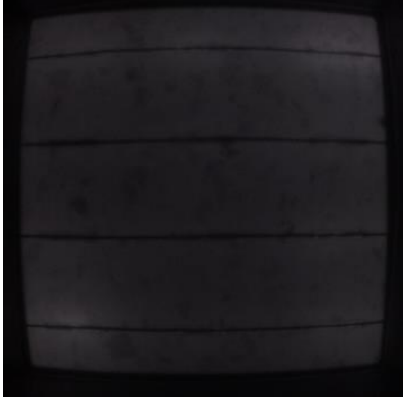
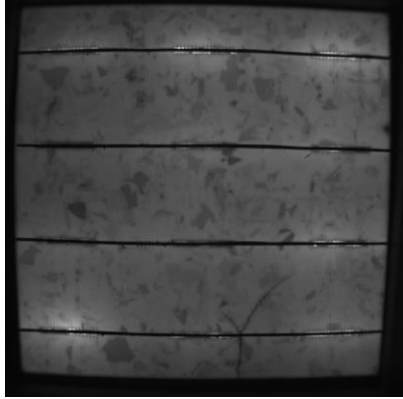
En esta célula puede observarse, a través de las fotografías tomadas con la cámara de silicio (RPI), como el incremento de la intensidad se encuentra proporcionalmente relacionado con la luminosidad captada por la EL, ya que se puede observar una diferencia notoria entre las imágenes de 6 A y 12 A, siendo más luminosa la fotografía tomada con 12 A de flujo de corriente.

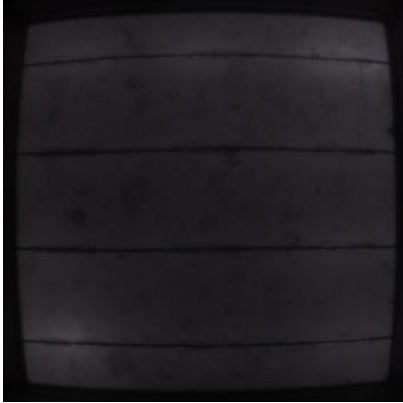
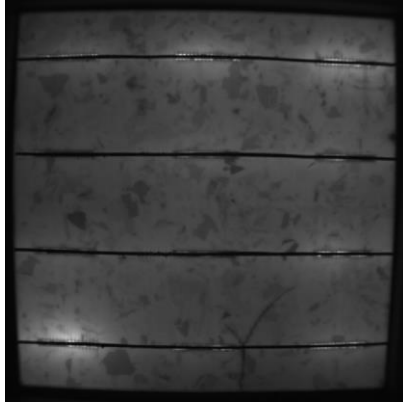
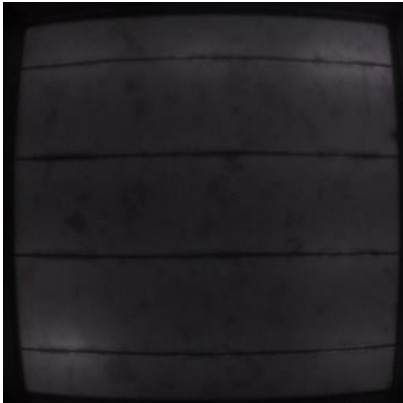
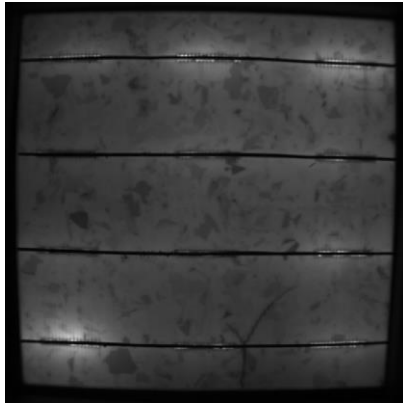
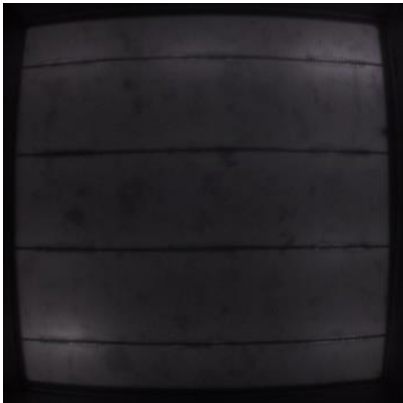
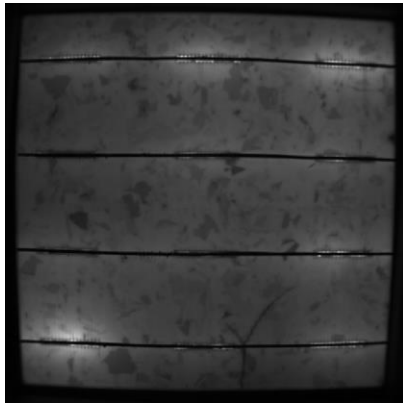
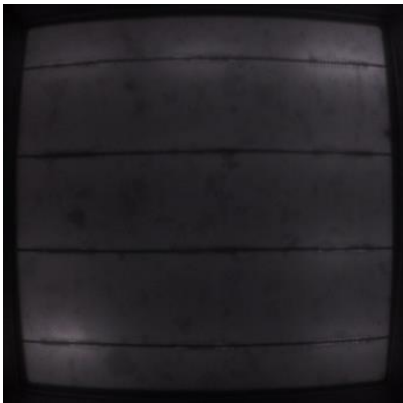
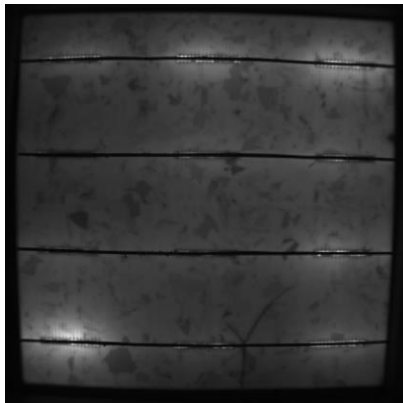
Sin embargo, este incremento de la luminosidad no es apreciable en la cámara de InGaAs, ya que su mayor sensibilidad al espectro de emisión permite que incluso a 6 A las imágenes sean claras y nítidas.

Un fenómeno que si que se aprecia en las imágenes tomadas por ambas cámaras es la aparición de brillos en determinados puntos de los bus bar de la célula, siendo estos debidos a que en estas zonas el contacto eléctrico es mejor que en el resto del área, provocando una mayor densidad de corriente, lo que desencadena en una mayor recombinación y, consecuentemente, EL.

Finalmente, una de las características observables en estas fotografías es un pequeño crack en la parte inferior de la célula, solo apreciándose en la imagen tomada con el sensor de InGaAs, debido a que las imágenes tomadas con la cámara de silicio (RPI) fueron tomadas primero, y probablemente en la manipulación de la célula sufrió algún tipo de esfuerzo accidental que quebró esta. Esto puede comprobarse en las fotografías tomadas a la célula III, la cual presenta cracks similares que son observables a través de ambas cámaras.

Tabla 1: Comparativa de las imágenes tomadas a la Célula I con las cámaras RPI e InGaAs variando la corriente (Fuente: Elaboración propia).

| Intensidad | Célula I RPI                                                                        | Célula I InGaAs                                                                      |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 A        |    |    |
| 7 A        |   |   |
| 8 A        |  |  |

|             |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>9 A</p>  |    |    |
| <p>10 A</p> |   |   |
| <p>11 A</p> |  |  |
| <p>12 A</p> |  |  |


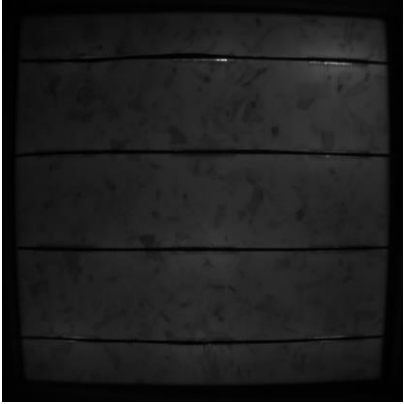

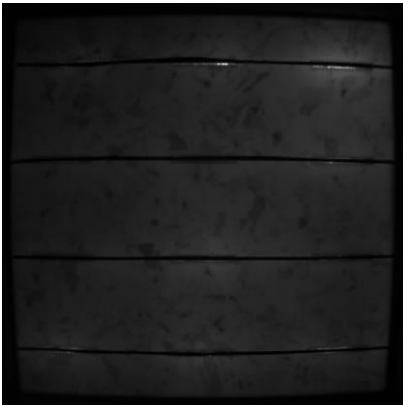
## 2.1.2. CÉLULA II


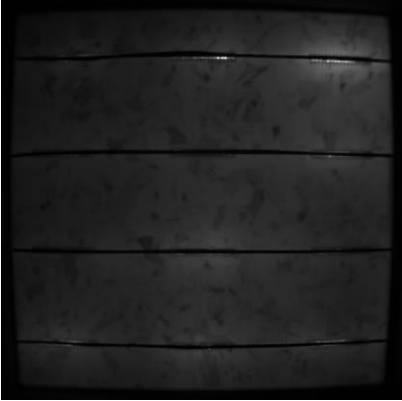

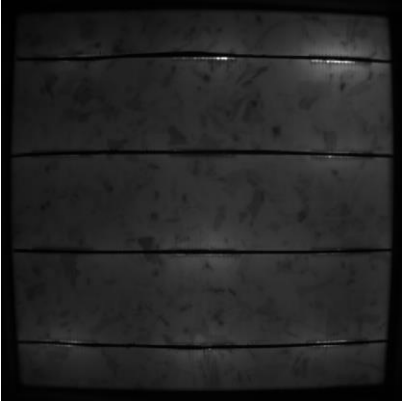

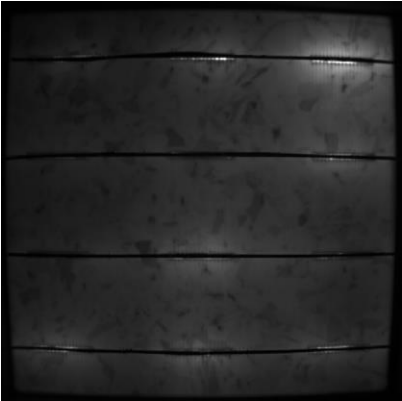

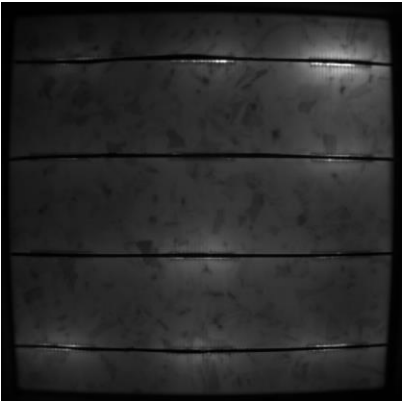
En las fotografías tomadas a esta célula pueden observarse los mismos fenómenos que en la Célula I, ya que con el incremento de la intensidad se produce un cambio apreciable en la luminosidad debido a una mayor EL, siendo más notoria en las imágenes tomadas por la cámara RPI, como consecuencia de su menor sensibilidad.

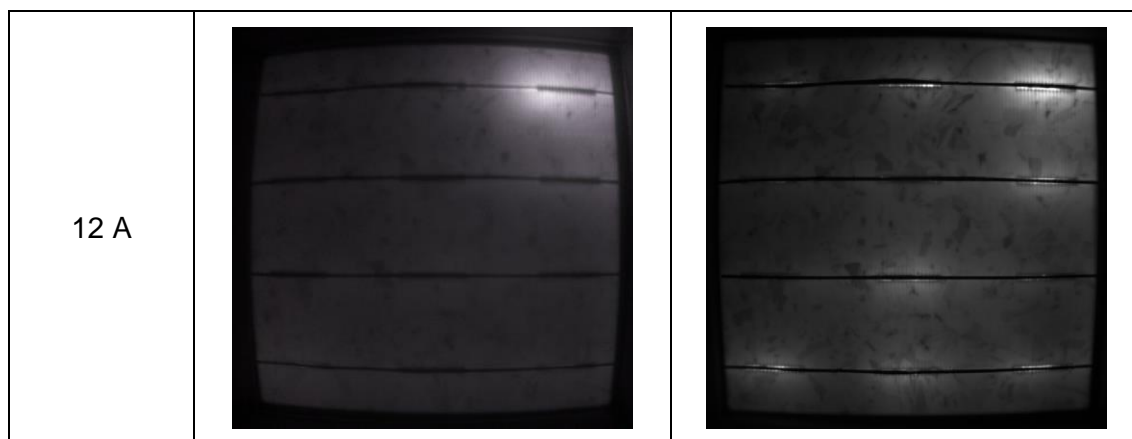
Además, se observan varios brillos en diferentes puntos de los bus bar, principalmente en las soldaduras, debido a la menor resistencia que ofrece al paso de la corriente y a la mayor EL que se genera en estas zonas.

En esta célula no se aprecia ningún tipo de defecto.

Tabla 2: Comparativa de las imágenes tomadas a la Célula II con las cámaras RPI e InGaAs variando la corriente (Fuente: Elaboración propia).

| Intensidad | Célula II RPI                                                                       | Célula II InGaAs                                                                     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 A        |  |  |
| 7 A        |  |  |

|      |                                                                                     |                                                                                      |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 8 A  |    |    |
| 9 A  |   |   |
| 10 A |  |  |
| 11 A |  |  |



### 2.1.3. CÉLULA III


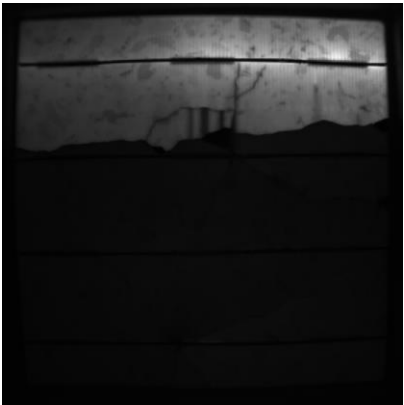

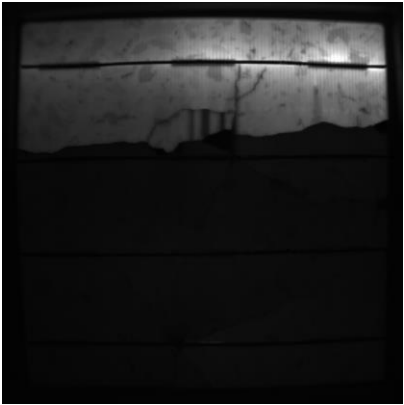

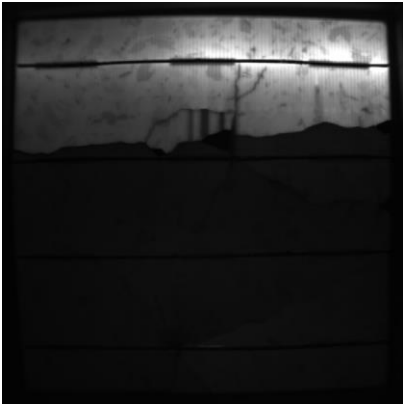
En la Célula III se cumplen los mismos fenómenos ocurridos con las dos células anteriores, apreciándose la relación proporcional entre la inyección de corriente y la emisión de la EL (principalmente en la cámara RPI), así como la aparición de los brillos anteriormente descritos.

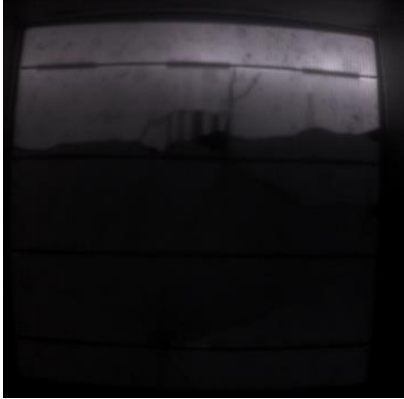
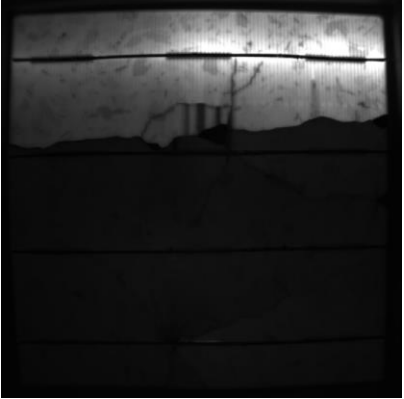
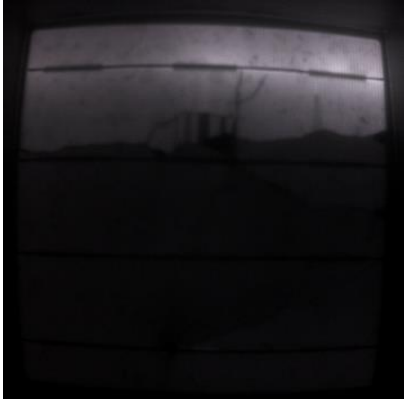
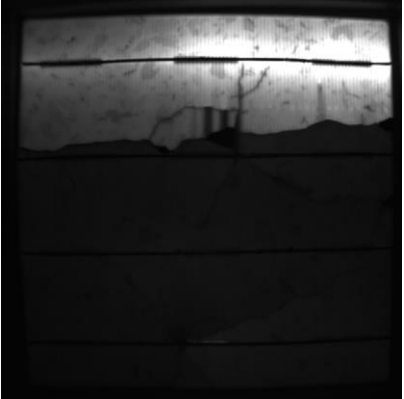
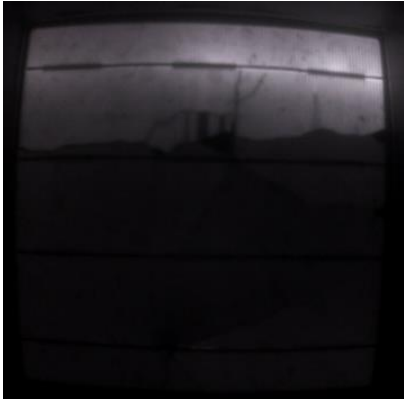
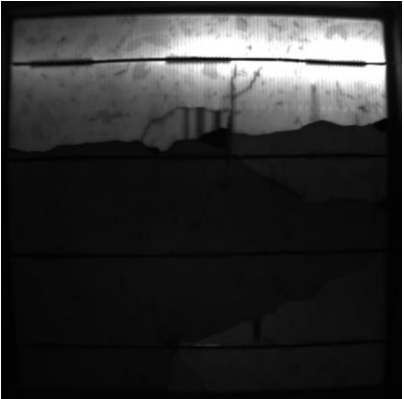
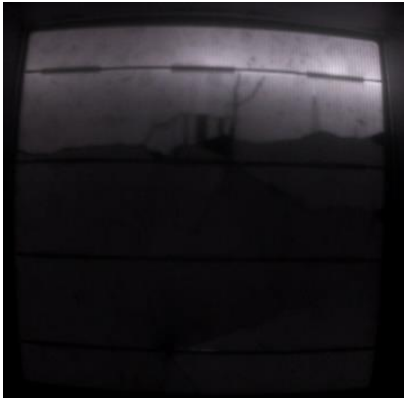
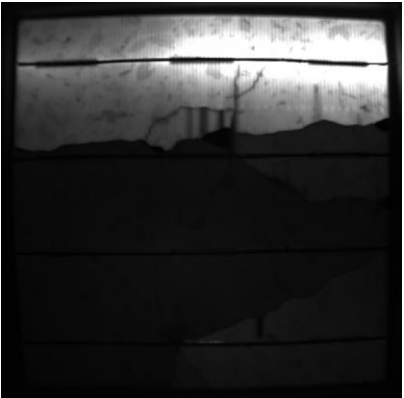
Esta célula presenta una gran rotura paralela a los bus bar, provocando que solo se encuentre operativa aproximadamente un tercio de la célula, ya que el resto se encuentra desconectada.

Además, en ambas cámaras se observan cracks en la parte central superior, siendo estos más nítidos en la imagen tomada con el sensor de InGaAs, pero también apreciables por el sensor de silicio.

Debido a que la mayor parte del área de la célula se encuentra desconectada, la densidad de corriente que circula por el área funcional de la célula es mayor, provocando brillos de mayor intensidad que en las fotografías de las células anteriores.

Tabla 3: Comparativa de las imágenes tomadas a la Célula III con las cámaras RPI e InGaAs variando la corriente (Fuente: Elaboración propia).

| Intensidad | Célula III RPI                                                                                                                                                                                        | Célula III InGaAs                                                                                                                                                                                                 |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6 A        |  A dark, low-contrast image showing a landscape silhouette against a dark sky, captured with an RPI camera at 6 A.   |  A high-contrast, grayscale image showing a landscape silhouette against a bright sky, captured with an InGaAs camera at 6 A.   |
| 7 A        |  A dark, low-contrast image showing a landscape silhouette against a dark sky, captured with an RPI camera at 7 A.  |  A high-contrast, grayscale image showing a landscape silhouette against a bright sky, captured with an InGaAs camera at 7 A.  |
| 8 A        |  A dark, low-contrast image showing a landscape silhouette against a dark sky, captured with an RPI camera at 8 A. |  A high-contrast, grayscale image showing a landscape silhouette against a bright sky, captured with an InGaAs camera at 8 A. |

|      |                                                                                     |                                                                                      |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 A  |    |    |
| 10 A |   |   |
| 11 A |  |  |
| 12 A |  |  |



### 3. CONCLUSIONES

En las células puede observarse, a través de las fotografías tomadas con la cámara de silicio (RPI), como el incremento de la intensidad se encuentra proporcionalmente relacionado con la EL emitida por la célula solar fotovoltaica, ya que se puede observar una diferencia notoria entre las imágenes tomadas inyectando 6 A y 12 A, emitiendo una mayor EL la fotografía tomada a 12 A de flujo de corriente.

Sin embargo, este incremento de la luminosidad no se aprecia con tanta claridad en la cámara de InGaAs, ya que su mayor sensibilidad al espectro de emisión permite que incluso las imágenes tomadas con 6 A sean claras y nítidas.

Un fenómeno que sí que se aprecia en las imágenes tomadas por ambas cámaras es la aparición de brillos en determinados puntos de los bus bar de las células, siendo estos provocados por un mejor contacto eléctrico en estas zonas en comparación con el resto del área, resultando en una mayor densidad de corriente en estos puntos, lo que desencadena en una mayor recombinación y, consecuentemente, EL.

También se ha podido comprobar como ambas técnicas de EL han sido capaces de apreciar las roturas presentes en las células, siendo esto más notorio en las imágenes tomadas a la Células III, que presenta tanto cracks perpendiculares como paralelos a los bus bars.

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                     |   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Tabla 1: Comparativa de las imágenes tomadas a la Célula I con las cámaras RPI e InGaAs variando la corriente (Fuente: Elaboración propia). .....   | 3 |
| Tabla 2: Comparativa de las imágenes tomadas a la Célula II con las cámaras RPI e InGaAs variando la corriente (Fuente: Elaboración propia). .....  | 5 |
| Tabla 3: Comparativa de las imágenes tomadas a la Célula III con las cámaras RPI e InGaAs variando la corriente (Fuente: Elaboración propia). ..... | 8 |

## **ANEXO IV:**

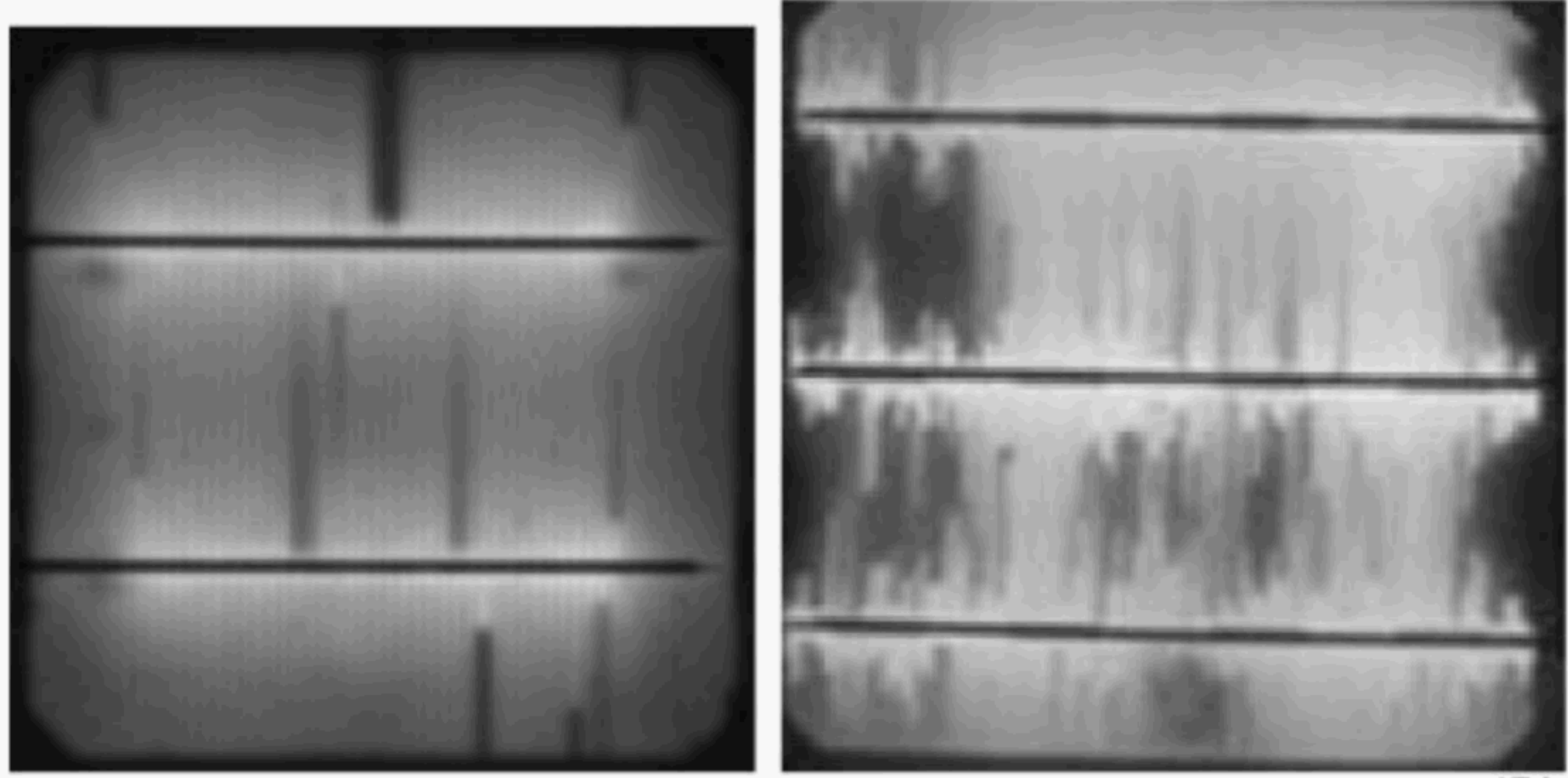

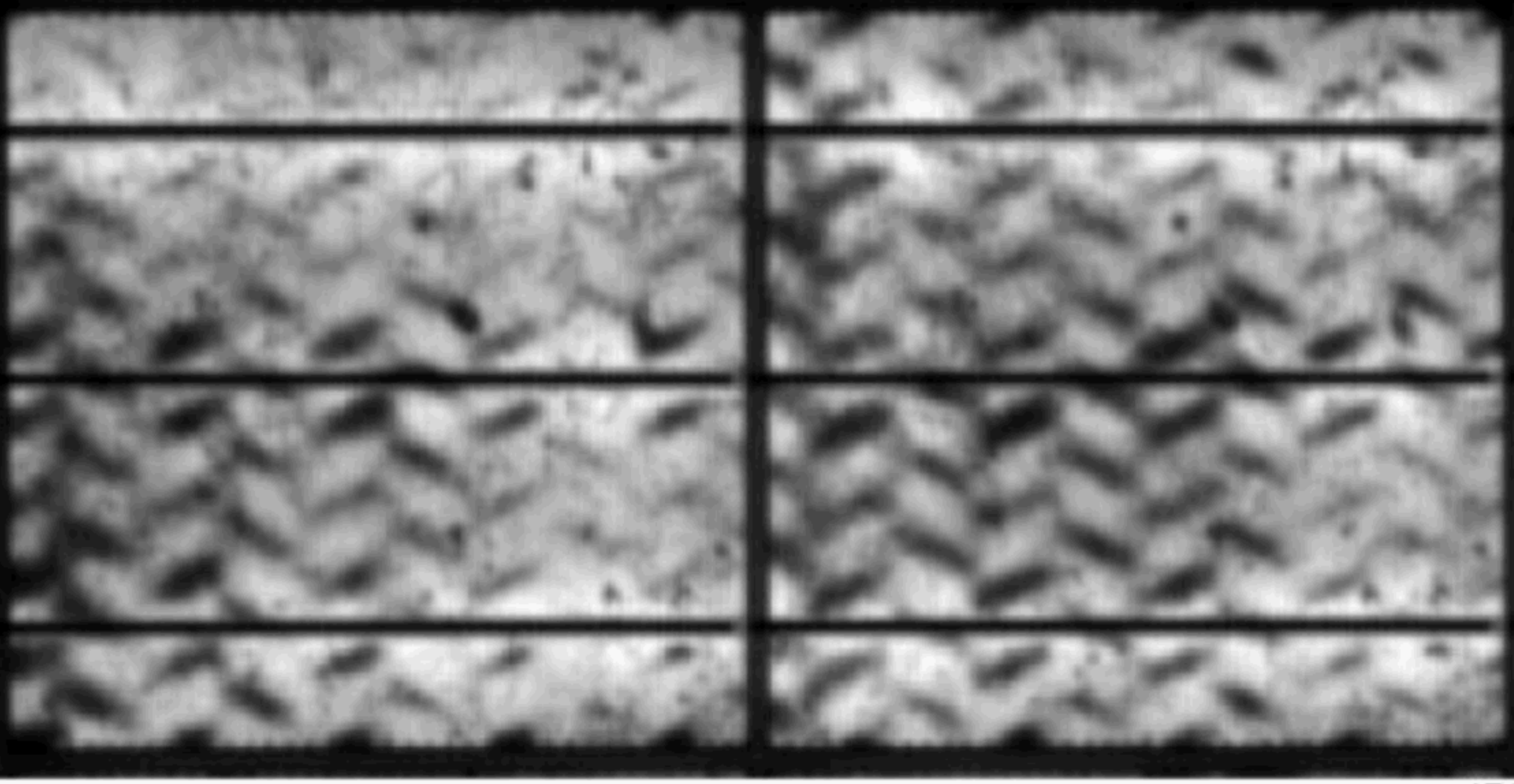
**ANEXO D.1 DEL IEC TS 60904 – 13:2018**

## Annex D (informative)

### D.1 Qualitative interpretation of electroluminescence images crystalline Si PV modules

This annex should be used along with the information in 5.1 and 5.2 for understanding the root cause, and 5.2.4 for understanding the current bias level dependence of defects causing shunts or manifesting in areas of higher series resistance, see Tables D.1 and D.2.

**Table D.1 – Descriptions of observables, features, and known causes, along with electroluminescence images for crystalline Si modules**

| Defect type and prognosis                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Image                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Missing, broken, or delaminated grid finger lines.</b> Missing or broken grid fingers (confirmable by visual inspection) are generally stable and their influence is captured in the efficiency of the cell.</p> <p>Grid finger adhesion may continue to degrade over time, degrading the cell and module performance.</p> |  <p style="text-align: right; font-size: small;">IEC</p>  |
| <p><b>Reduced lifetime-cast silicon origin.</b></p> <p>Existing over particular grains or regions of the ingot that contain elevated defect or impurity concentrations. They are generally stable over time and their influence is largely captured in the initial efficiency of the cell and module.</p>                        |  <p style="text-align: right; font-size: small;">IEC</p> |
| <p><b>Belt marks.</b> Developed during cell firing, they are generally stable over time and their influence is captured in the initial efficiency of the cell and module.</p>                                                                                                                                                    |  <p style="text-align: right; font-size: small;">IEC</p> |

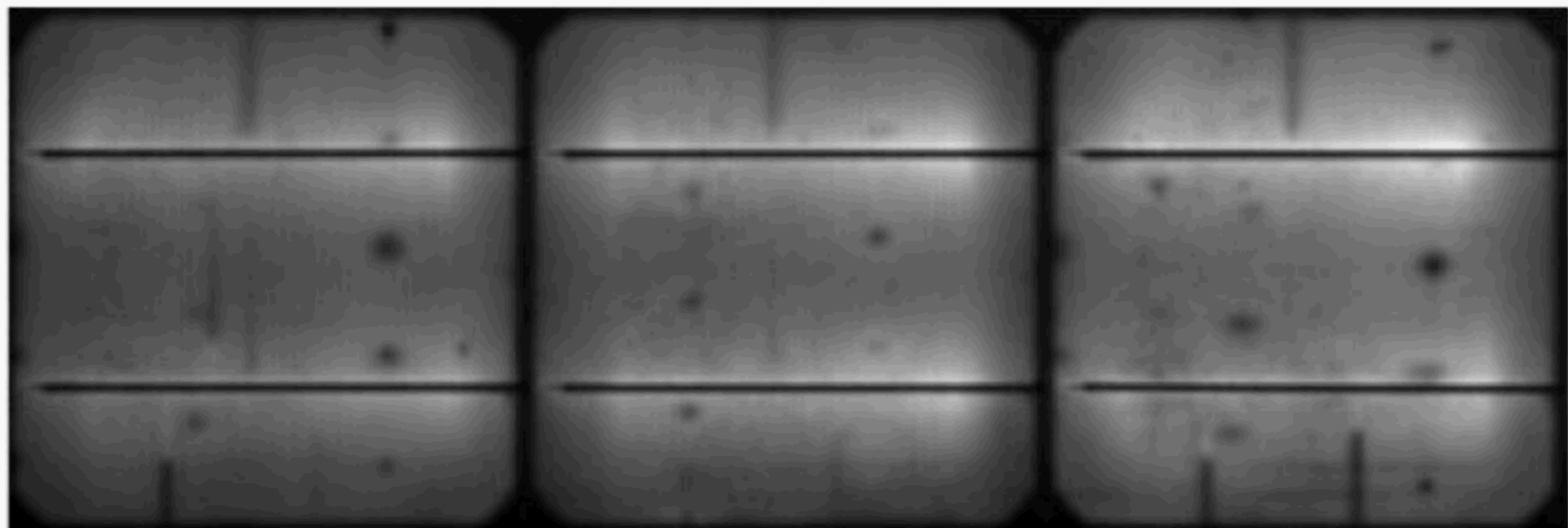


**Adhered wafers during processing.** Areas of poor contact resistance or improper junction formation during cell processing. They are generally stable over time and their influence is captured in the initial performance of the cell and module.



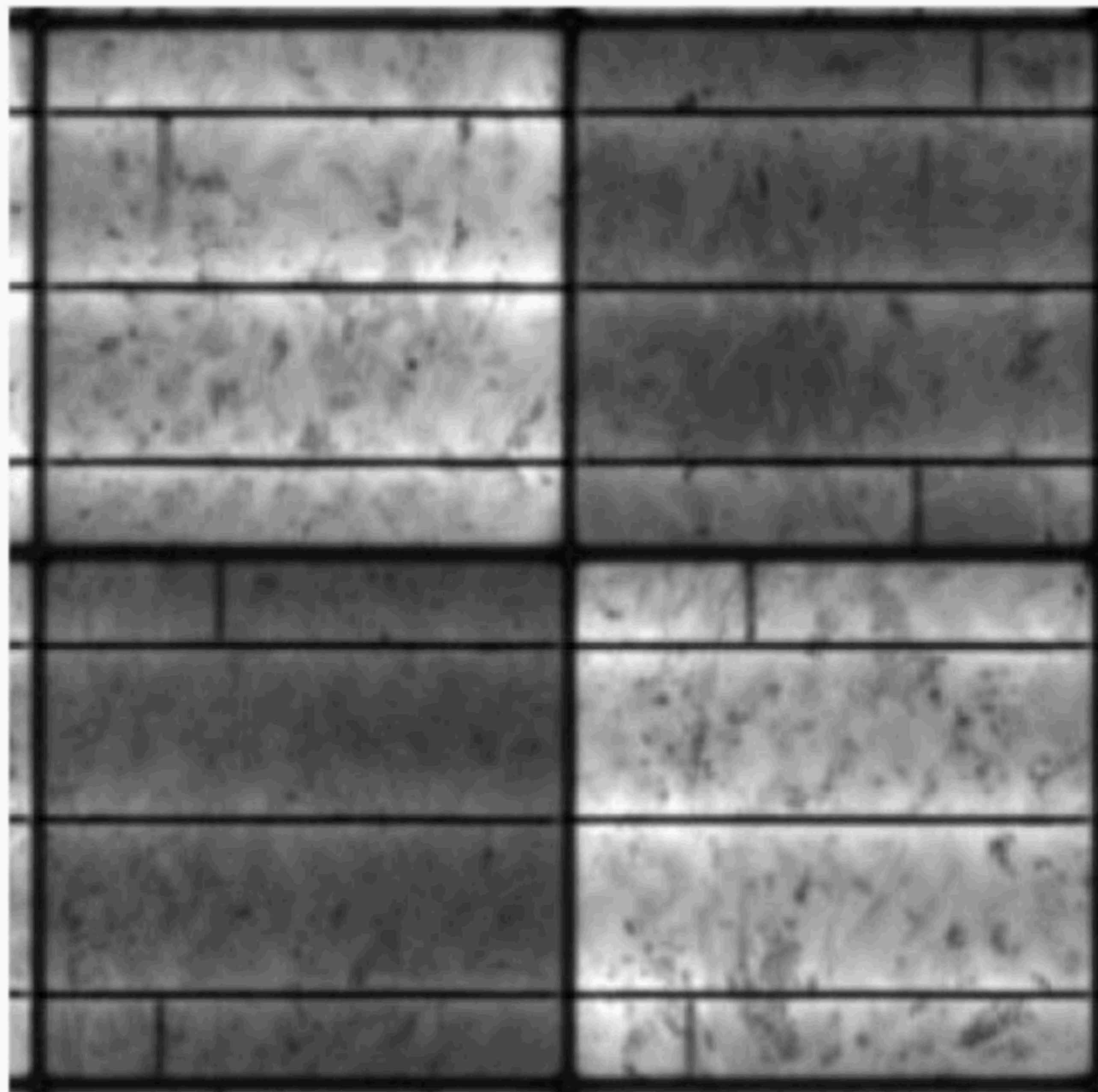
IEC

**Wafer/cell contamination.** Localized areas of low EL signal, especially when systematic from cell to cell, may be assignable to wafer/cell contamination by handling equipment. Alternatively, localized shunting due to material (such as contact metallization paste) contamination. They are generally stable over time and their influence is captured in the initial efficiency.



IEC

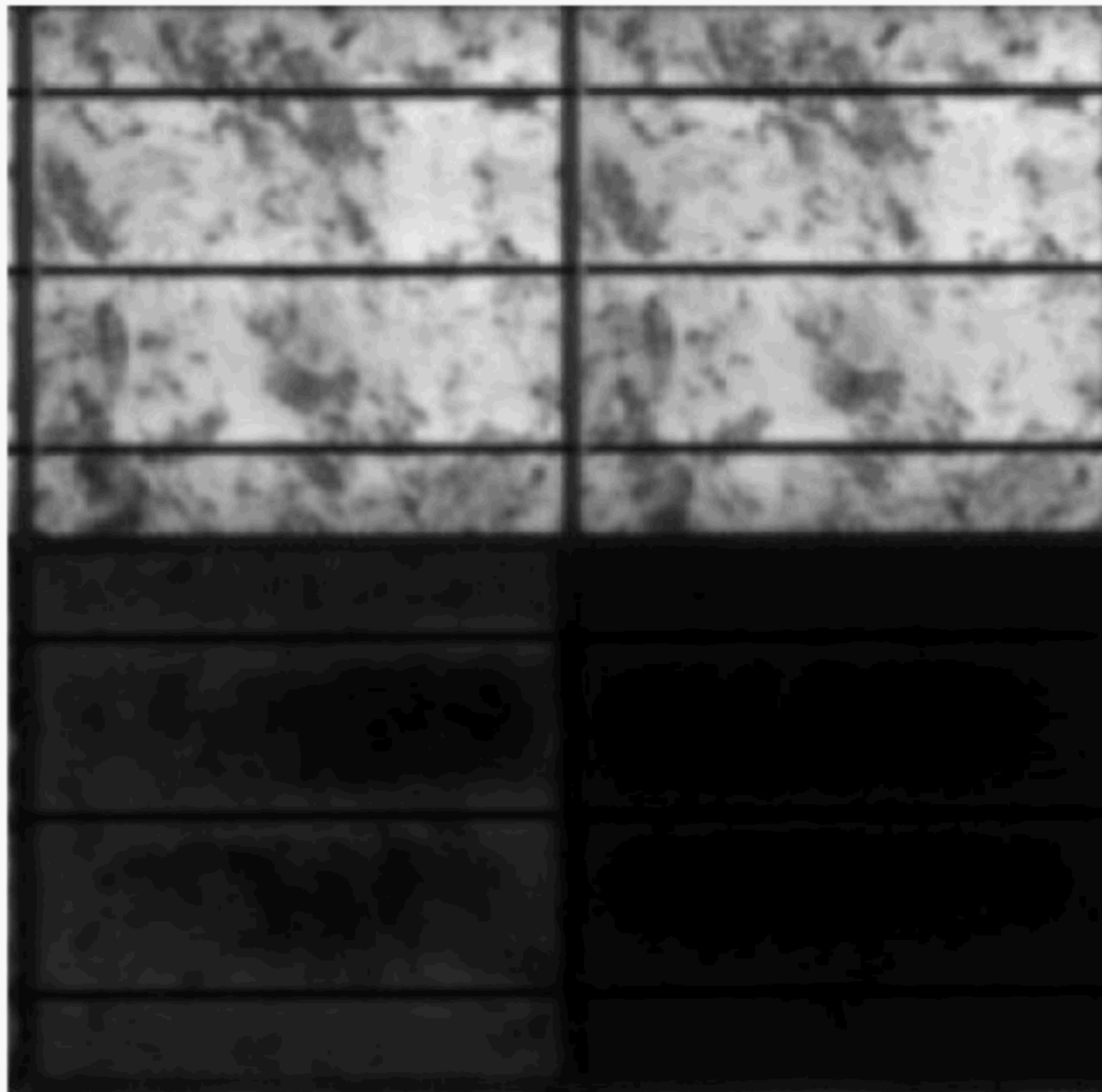
**Cell-wide lower minority carrier lifetime.** This may occur from lower minority carrier lifetime based on the position of the wafer in the ingot that it came from and impurities in the wafer inherently contained. Such defects may be alternatively associated with cell shunting. Grid finger breakage is also seen in this image.



IEC

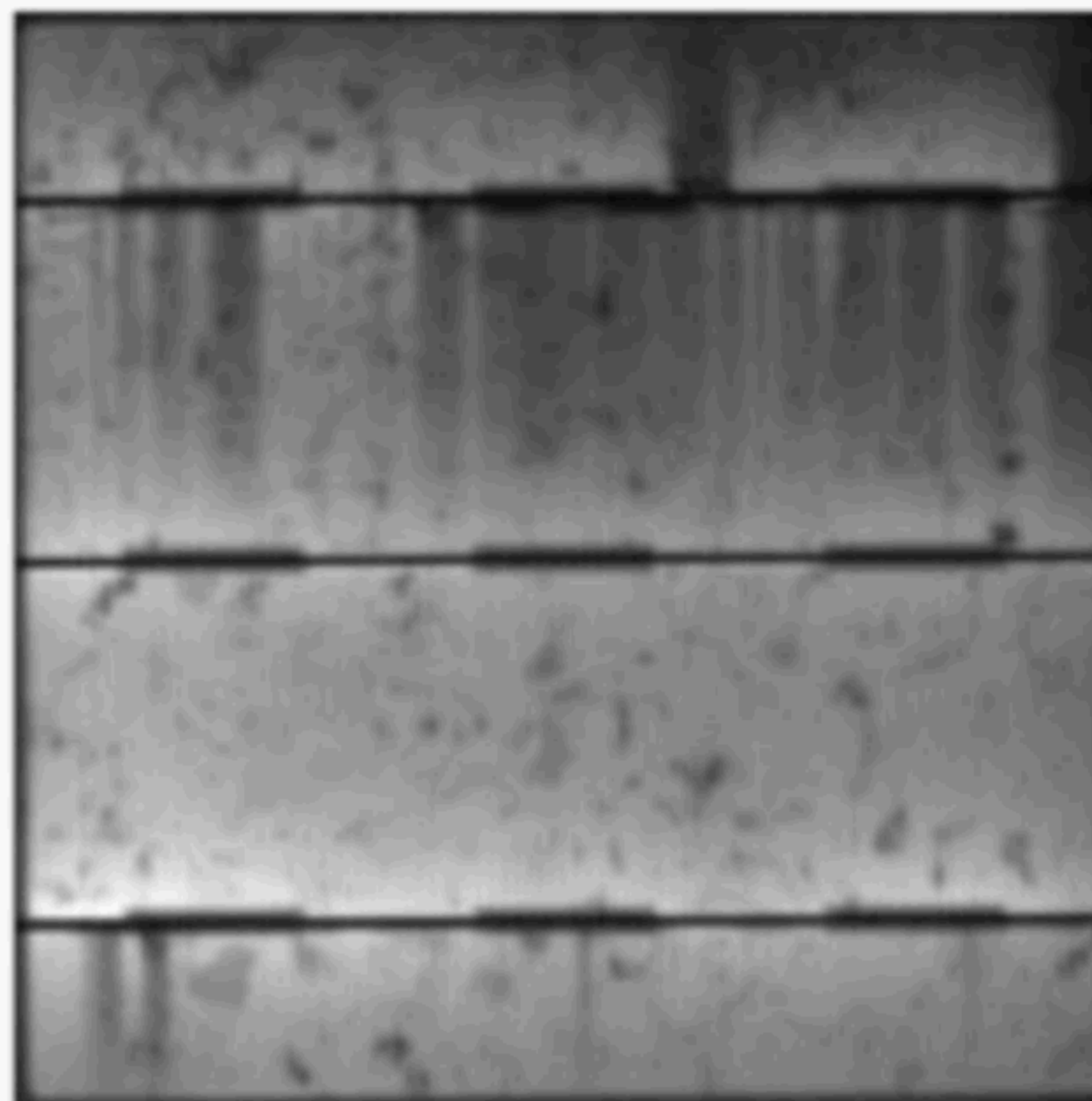


**Degradation of the cell by Potential-induced degradation (PID).** Reduced electro-luminescence of full cell-area at  $0,1 \times I_{sc}$  forward current, associated with excessive junction shunting. Such defects developing in fielded modules may lead to hot spots. Images taken with  $0,1 \times I_{sc}$  forward current will more frequently show full cell darkening because the shunt lowers voltage across the junction. At  $I_{sc}$ , recombination at the shunt may be saturated, showing recombination in EL only at the shunt location.



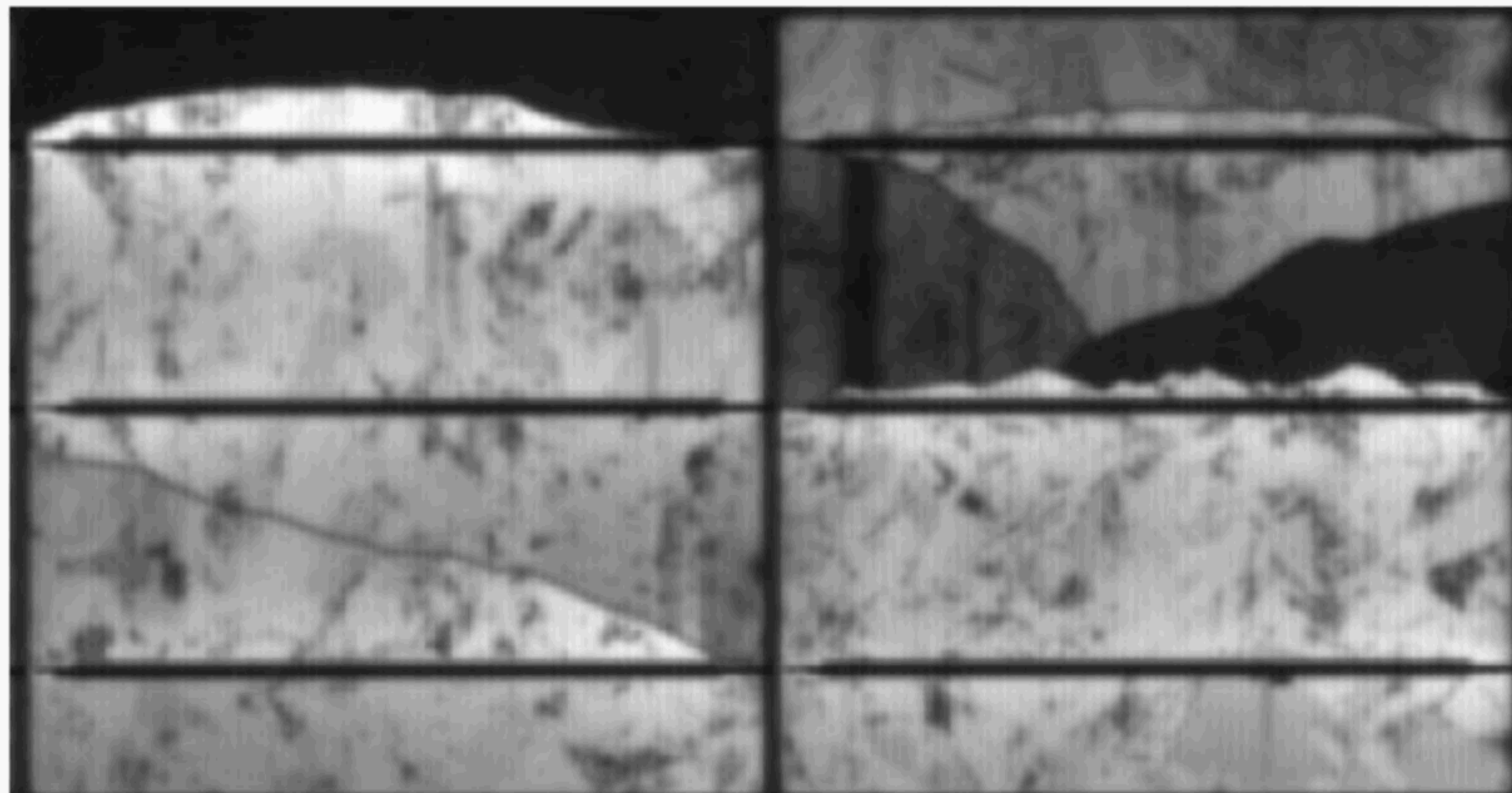
IEC

**Improper interconnection or tab ribbon bonding.** Series resistance elevated over portion of the cell associated with improper interconnection or tab ribbon bonding. Higher current forced through remaining ribbons yields a higher probability of hot spots and module failure.



IEC

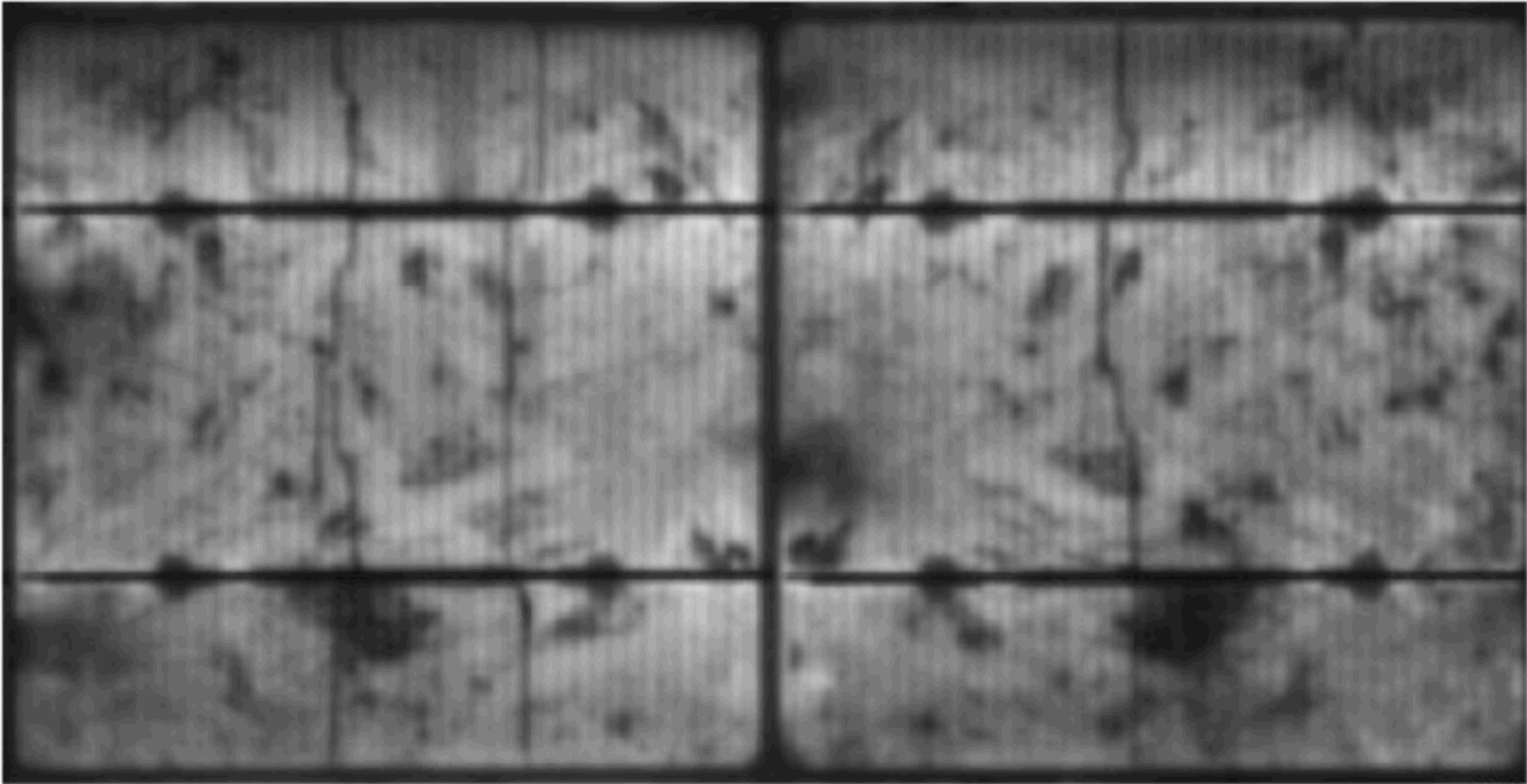
**Cell cracking.** Cracks that cause isolation of regions of the cell. (Example, top left) tend to be more severe because there are no alternative current paths to the cell circuit in the module. This type of cracking may lead to hot spots.



IEC

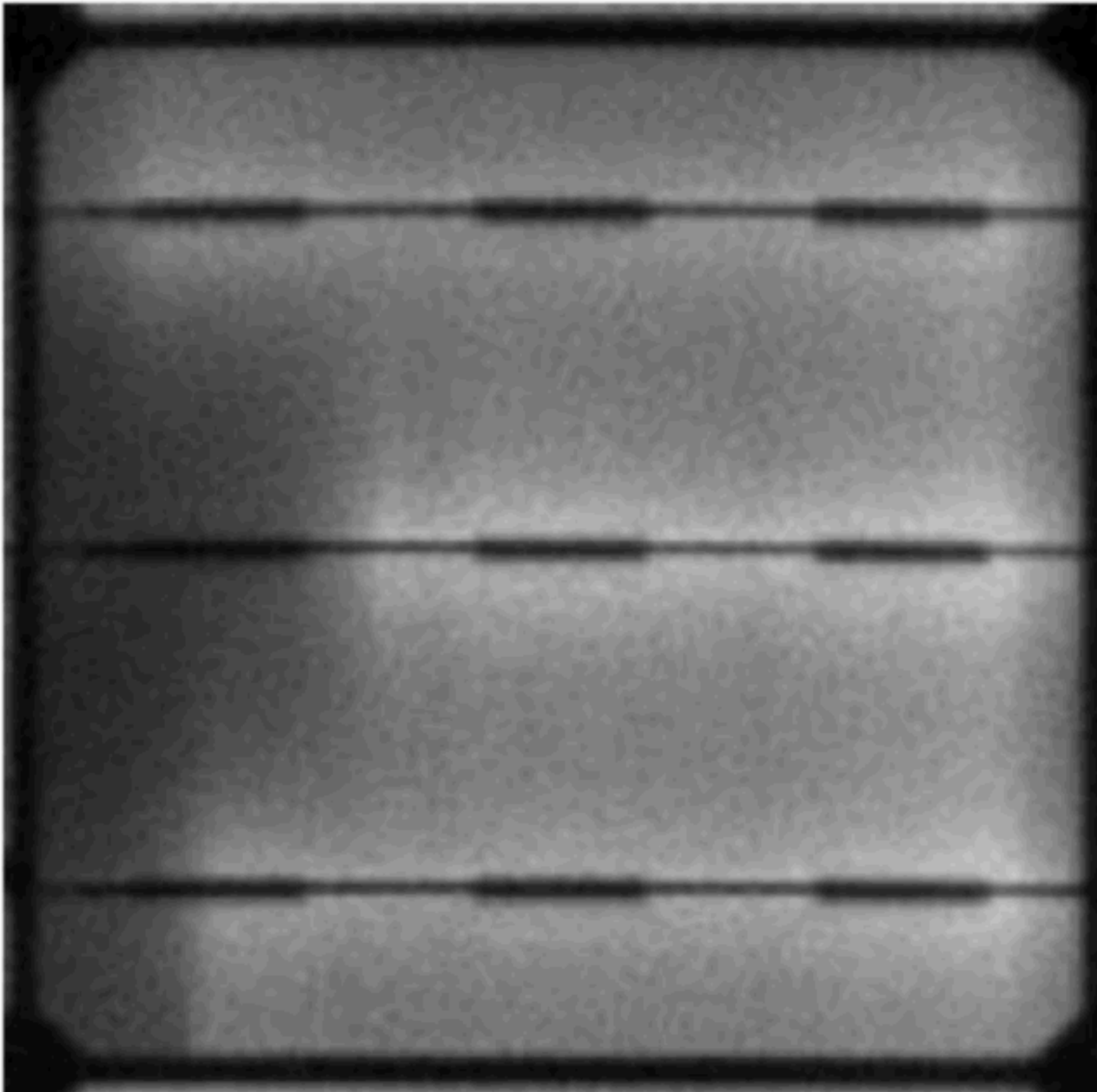


**Cell cracking (essentially parallel to grid fingers).** Susceptible to further degradation if cracks expand, but less severely than cracks parallel to the current collecting tabs (above).



IEC

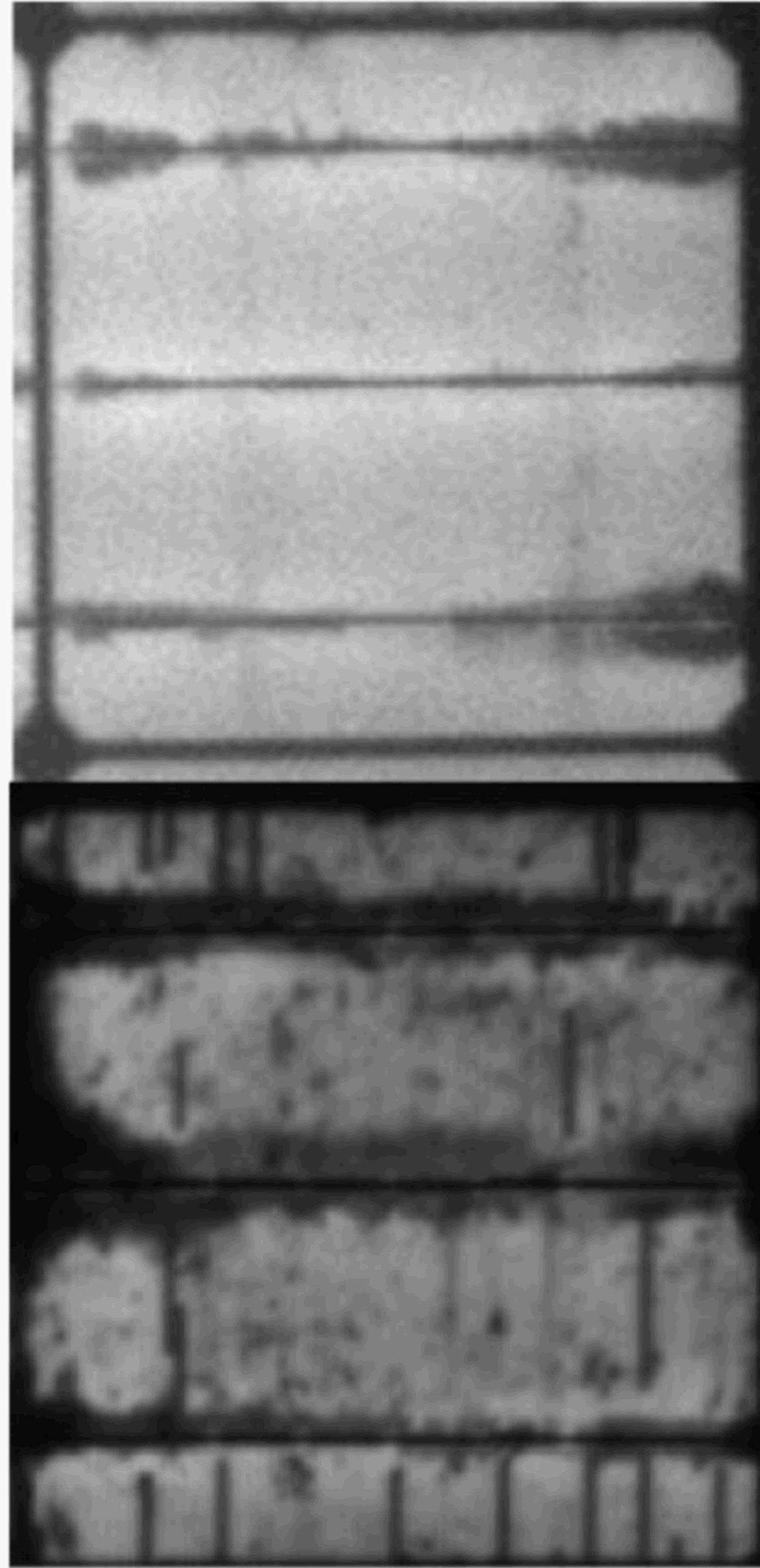
**Poor ribbon soldering.** Characterized by relatively distinct areas of low luminescence associated with series resistance. Maybe indicative of substandard soldering process leading to higher series resistance, hot spots, and module failure.



IEC



**Solder flux interaction with grid finger metallization—silicon interface.** May be indicative of substandard soldering process leading to higher series resistance, hot spots, module degradation and failure. These defects, which degrade performance, increase over time with elevated humidity.



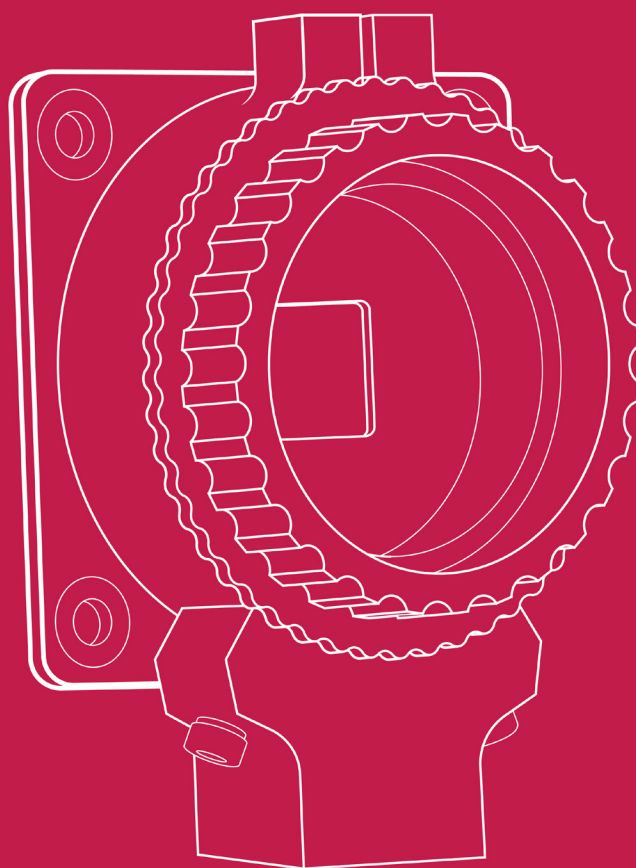
IEC



# **ANEXO V:**

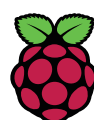
## **DATASHEET RASPBERRY PI HIGH QUALITY CAMERA**

# Raspberry Pi High Quality Camera



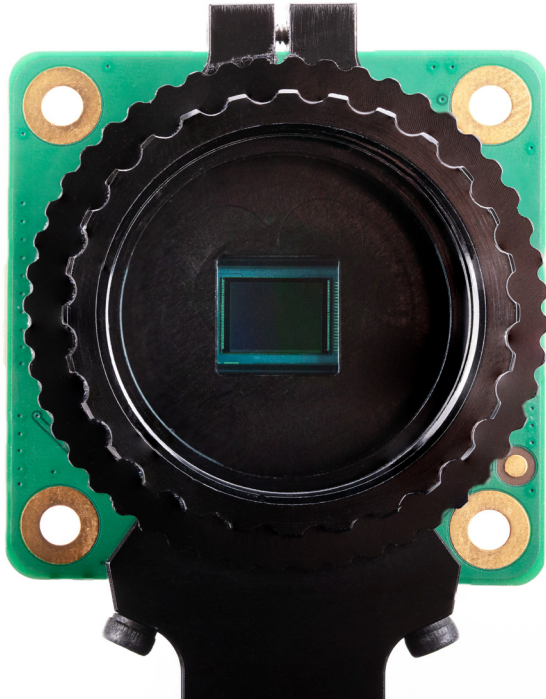
Published in April 2020  
by Raspberry Pi Trading Ltd.

[www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)



Raspberry Pi

# Overview



The Raspberry Pi High Quality Camera is the latest camera accessory from Raspberry Pi. It offers higher resolution (12 megapixels, compared to 8 megapixels), and sensitivity (approximately 50% greater area per pixel for improved low-light performance) than the existing Camera Module v2, and is designed to work with interchangeable lenses in both C- and CS-mount form factors. Other lens form factors can be accommodated using third-party lens adapters.

The High Quality Camera provides an alternative to the Camera Module v2 for industrial and consumer applications, including security cameras, which require the highest levels of visual fidelity and/or integration with specialist optics. It is compatible with all models of Raspberry Pi computer from Raspberry Pi 1 Model B onwards, using the latest software release from [www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org).<sup>1</sup>

The package comprises a circuit board carrying a Sony IMX477 sensor, an FPC cable for connection to a Raspberry Pi computer, a milled aluminium lens mount with integrated tripod mount and focus adjustment ring, and a C- to CS-mount adapter.

---

<sup>1</sup> Excluding early Raspberry Pi Zero models, which lack the necessary FPC connector. Later Raspberry Pi Zero models require an adapter FPC, sold separately.

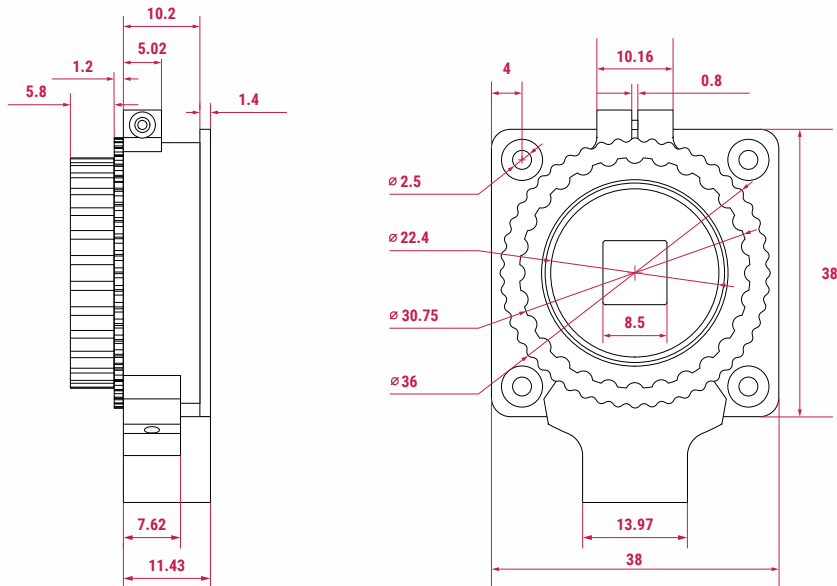
# Specification

|                             |                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sensor:</b>              | Sony IMX477R stacked, back-illuminated sensor<br>12.3 megapixels<br>7.9 mm sensor diagonal<br>1.55 $\mu\text{m}$ $\times$ 1.55 $\mu\text{m}$ pixel size                                            |
| <b>Output:</b>              | RAW12/10/8, COMP8                                                                                                                                                                                  |
| <b>Back focus:</b>          | Adjustable (12.5 mm–22.4 mm)                                                                                                                                                                       |
| <b>Lens standards:</b>      | CS-mount<br>C-mount (C-CS adapter included)                                                                                                                                                        |
| <b>IR cut filter:</b>       | Integrated <sup>2</sup>                                                                                                                                                                            |
| <b>Ribbon cable length:</b> | 200 mm                                                                                                                                                                                             |
| <b>Tripod mount:</b>        | 1/4"-20                                                                                                                                                                                            |
| <b>Compliance:</b>          | FCC 47 CFR Part 15, Subpart B, Class B Digital Device<br><br>Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)<br>2014/30/EU<br><br>Restriction of Hazardous Substances (RoHS)<br>Directive 2011/65/EU |
| <b>Production lifetime:</b> | The Raspberry Pi High Quality Camera will remain<br>in production until at least January 2026                                                                                                      |

---

<sup>2</sup> Can be removed to enable IR sensitivity. Modification is irreversible.

# Physical specifications



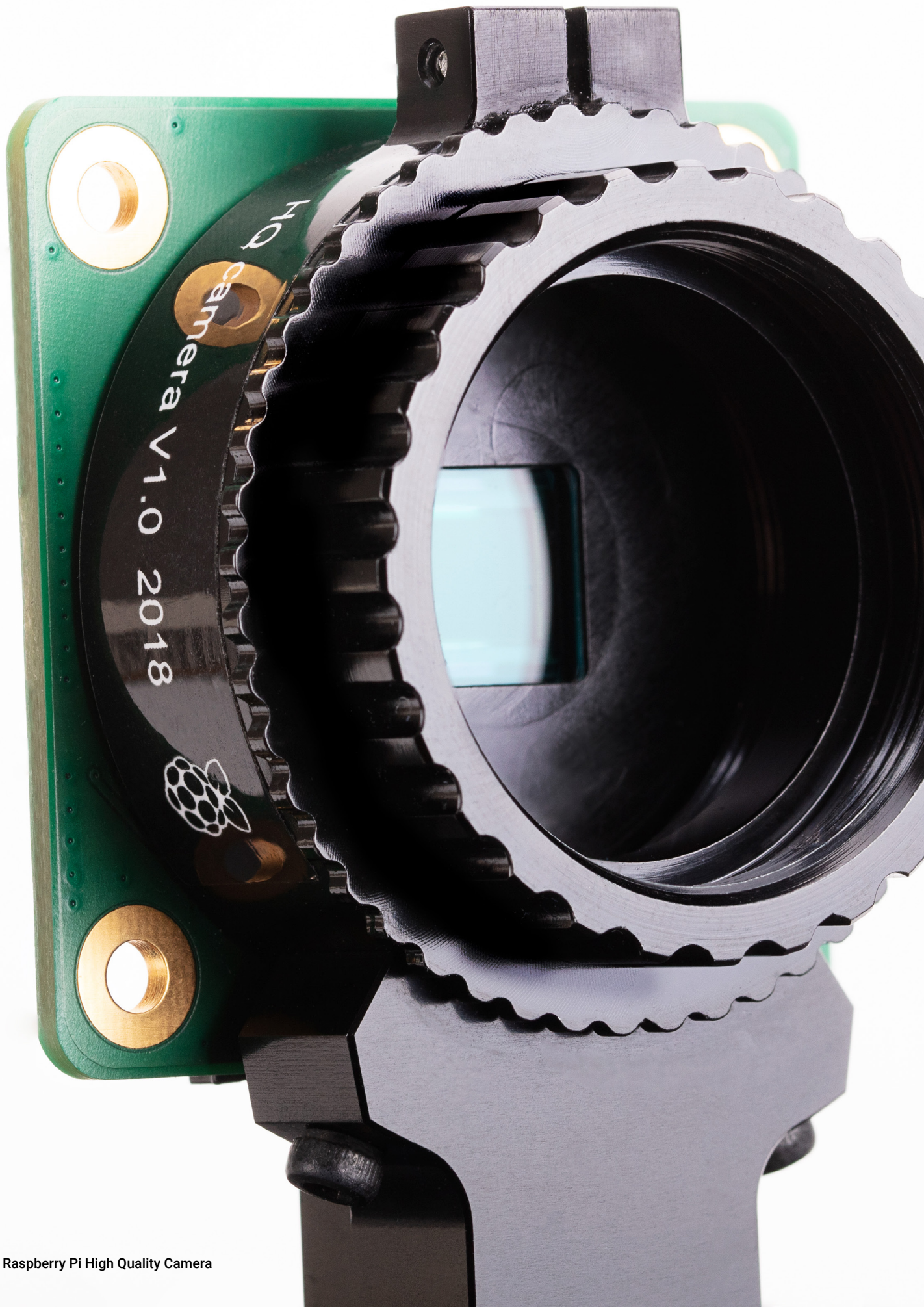
Note: all dimensions in mm

## SAFETY INSTRUCTIONS

To avoid malfunction or damage to this product, please observe the following:

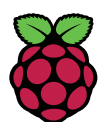
- **Before connecting the device, shut down your Raspberry Pi computer and disconnect it from external power.**
- If the cable becomes detached, pull the locking mechanism forward on the connector, insert the ribbon cable ensuring the metal contacts face towards the circuit board, then push the locking mechanism back into place.
- This device should be operated in a dry environment at 0–50°C.
- Do not expose it to water or moisture, or place on a conductive surface whilst in operation.
- Do not expose it to excessive heat from any source.
- Care should be taken not to fold or strain the ribbon cable.
- Care should be taken when screwing in parts or fitting a tripod. A cross-thread can cause irreparable damage and void the warranty.
- Take care whilst handling to avoid mechanical or electrical damage to the printed circuit board and connectors.
- Avoid handling the printed circuit board whilst it is powered and only handle by the edges to minimise the risk of electrostatic discharge damage.
- Store in a cool, dry location.
- Avoid rapid changes of temperature, which can cause moisture build up in the device, affecting image quality.





MIPI DSI and MIPI CSI are service marks of MIPI Alliance, Inc  
Raspberry Pi and the Raspberry Pi logo are trademarks of the Raspberry Pi Foundation

[www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)



**Raspberry Pi**

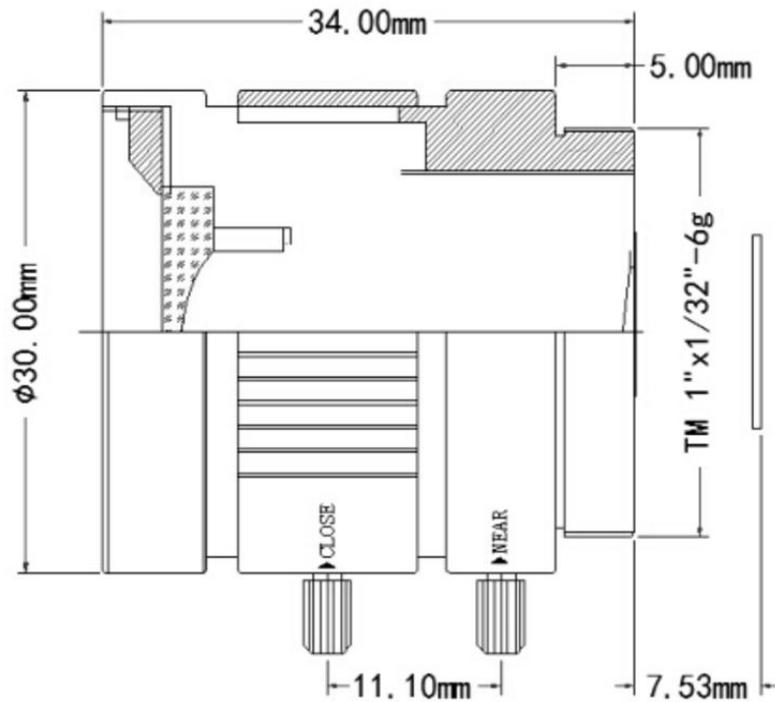
**ANEXO VI:**  
**DATASHEET RPI-6MM LENS**



## 镜头参数 ( Parameter of Lens )

|                                                                                   |                            |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| <b>型号 ( Model ) :</b>                                                             | PT361060M3MP12             |                 |
|  | 像面尺寸 ( Image format )      | 1/2"            |
|                                                                                   | 焦距 ( Focal length )        | 6mm             |
|                                                                                   | 分辨率 ( Resolution )         | 3 MegaPixel     |
|                                                                                   | 通光孔径 ( Aperture )          | F1.2            |
|                                                                                   | 接口 ( Mount )               | CS              |
|                                                                                   | 视场角 ( Field Angle)D×H×V(°) | 63°             |
|                                                                                   | 最近物距 (M.O.D.)              | 0.2m            |
|                                                                                   | 后焦距 (Back Focal Length)    | 7.53mm          |
|                                                                                   | 外形尺寸 (Dimension)           | φ30×34mm        |
|                                                                                   | 重量 ( Weight )              | 53g             |
|                                                                                   | 操作方法 (Operation)           | 手动光圈 ( Manual ) |

### 尺寸 ( Size )



|                             |             |  |  |
|-----------------------------|-------------|--|--|
| 尺寸公差Size tolerance ( mm ) : | 10-30±0.10  |  |  |
| 角度公差Angle tolerance         | 30-120±0.20 |  |  |

## **ANEXO VII:**

### **DATASHEET FUENTE DE ALIMENTACIÓN**

## «PeakTech® P 1585» Fuente Alimentación Laboratorio DC 1-60V/0-15A USB



492,50 €

Precios sin IVA, más gastos de envío y posiblemente un recargo por valor inferior

Número de producto: P 1585

EAN: 4250569403446

### Descripción

---

El PeakTech 1585 es una fuente de alimentación de alto rendimiento para un máximo de 60V/15A DC, equivalente a 900W de potencia continua. Los botones de doble función (ajuste aproximativo y preciso) permiten un ajuste preciso, rápido y sencillo de los valores de voltaje y corriente gracias al codificador rotativo y el microprocesador de control. Alternativamente, existe una conexión en la parte trasera para control analógico y un interruptor para variar entre valores preestablecidos. Todos los ajustes para el voltaje y corriente de salida, así como la temporización de programas y una función datalogger pueden implementarse mediante el software de PC incluido. Un puerto USB en la parte trasera permite conectar la fuente a un PC. El control de ventilación inteligente ajusta la velocidad de la ventilación a la temperatura. El voltaje de salida y el límite de corriente pueden establecerse sin una carga conectada. Todas estas características junto con su alto rendimiento y su diseño compacto hacen de esta fuente de alimentación un aparato ideal para la industria y la ingeniería mecánica.

### Características técnicas

---

- Fuente de alimentación de laboratorio DC con max. 60V/15A
- Display digital de 3 dígitos verde, 15mm
- Tomas con un conector adicional de 4mm (parte trasera)
- Tomas de seguridad de 4mm para max. 5A (frontal)
- Codificador rotativo con ajuste aproximativo y preciso pulsando un botón

- Interfaz USB y software de PC para control remoto
- 3 valores preestablecidos ajustables mediante interruptor
- Control remoto analógico en la toma trasera
- Ventilación controlada por temperatura
- Seguridad: EN 61010-1
- Accesorios: manual, cable de alimentación, adaptador para control remoto analógico

## Especificaciones

---

**Canales:** 1 CH

**Conector de entrada:** Toma IEC

**Corriente de salida:** 0 - 15 A

**Tensión de salida:** 1 - 60 V DC

**Tipo de pantalla:** Segmento

**USB:**

**Voltaje de entrada:** 230 VAC / 50 Hz

**ANEXO VIII:**  
**DATASHEET CÁMARA INGAAS**

# InGaAs camera C12741-03



## FEATURES

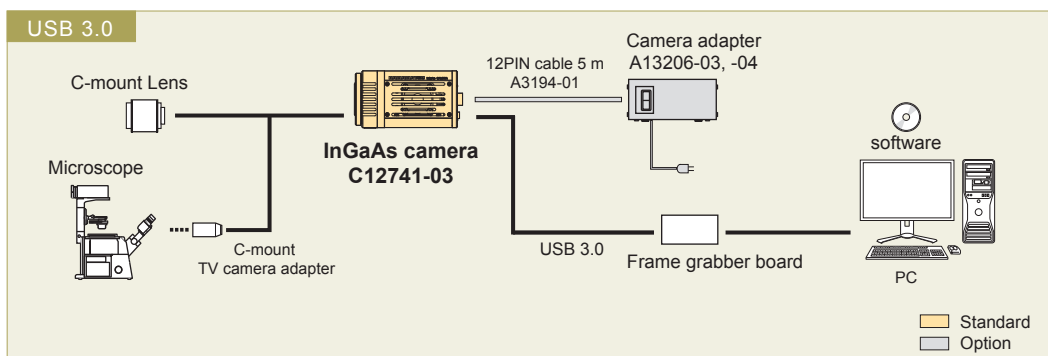
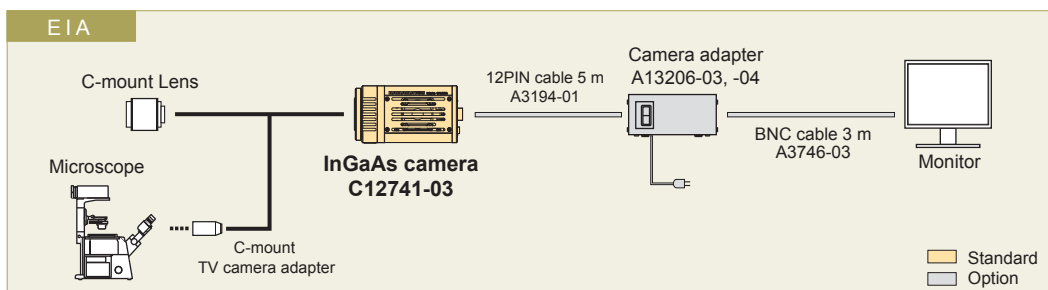
- High sensitivity in the near infrared region
- 640 × 512 pixels
- Low noise and high stability with cooling
- Simultaneous output from two interfaces: analog (EIA) port and USB 3.0 port
- Frame rate of 60 frames/s

## APPLICATIONS

- Internal inspections of silicon wafers and devices
- Evaluation of solar cells
- Evaluation and analysis of optical communication devices
- EL/PL image acquisition

The C12741-03 is an InGaAs camera with sensitivity in the near infrared region from 950 nm to 1700 nm. It has an analog output (EIA) and a USB 3.0 interface port which supports 14 bit image acquisition and exposure time adjustment. This makes the C12741-03 ideal for use in a wide range of applications including internal inspection of silicon wafers and devices, laser beam alignment and evaluation of solar cells.

## SYSTEM CONFIGURATION



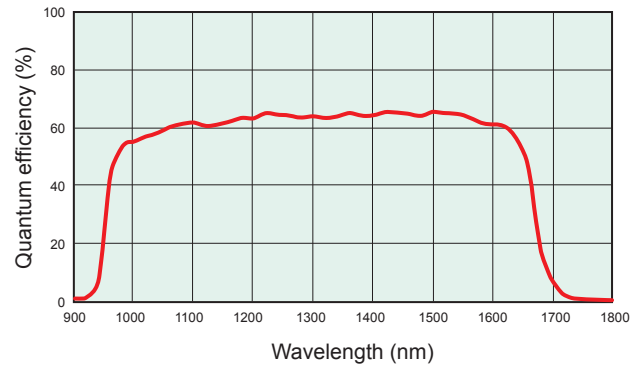
## SPECIFICATIONS

|                                  |                                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Type number                      | C12741-03                                          |
| Imaging device                   | InGaAs sensor                                      |
| Effective number of pixels       | 640 (H) × 512 (V)                                  |
| Pixel size                       | 20 μm (H) × 20 μm (V)                              |
| Effective area                   | 12.8 mm (H) × 10.24 mm (V)                         |
| Cooling method                   | Peltier cooling                                    |
| Cooling temperature              | Forced-air cooled<br>(Ambient temperature: +25 °C) |
|                                  | +10 °C                                             |
| Frame rate                       | 59.774 frames/s                                    |
| Digital output                   | 14 bit                                             |
| Exposure time *1                 | 16.7 ms to 1 s                                     |
| External trigger input mode      | Edge trigger, Level trigger, Start trigger         |
| Trigger delay function           | 0 s to 1 s in 10 μs steps                          |
| Trigger input connector          | SMA                                                |
| Interface                        | EIA, USB 3.0 *2                                    |
| Image processing functions       | Background subtraction,<br>Shading correction      |
| Lens mount                       | C-mount                                            |
| Connector                        | USB 3.0 microB type                                |
| Power supply                     | DC +12 V                                           |
| Power consumption                | Approx. 16 W                                       |
| Ambient operating temperature *1 | 0 °C to +40 °C                                     |
| Ambient operating humidity       | 30 % to 80 %<br>(with no condensation)             |
| Ambient storage temperature      | -10 °C to +50 °C                                   |
| Ambient storage humidity         | 90 % max.<br>(with no condensation)                |

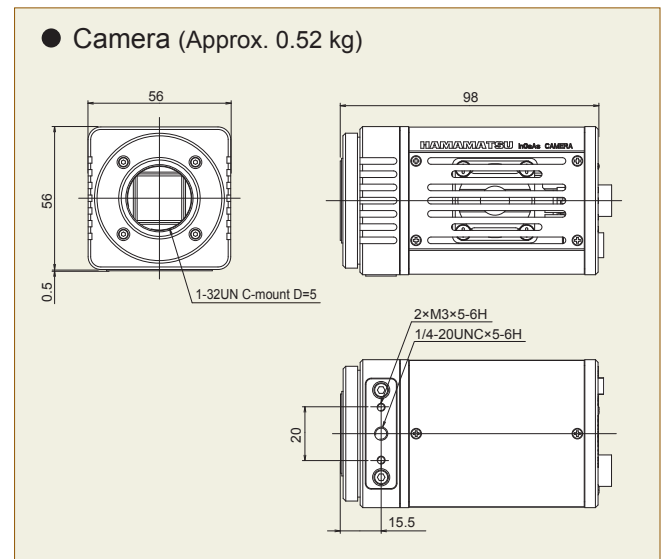
\*1: Depend on the exposure time or ambient temperature, brighter or darker pixels than surrounding area or uneven pattern may appear in the image.  
It comes from the characteristics of InGaAs sensor and not the defects or failure of the camera.

\*2: Equivalent to USB 3.1 Gen 1

## SPECTRAL RESPONSE



## DIMENSIONAL OUTLINES (Unit : mm)



## OPTIONS

- Camera adapter: A13206-03 (for US)  
: A13206-04 (for EU)
- 12PIN cable 5 m: A3194-01
- BNC cable 3 m: A3746-03

★ **Product and software package names noted in this documentation are trademarks or registered trademarks of their respective manufacturers.**

- Subject to local technical requirements and regulations, availability of products included in this promotional material may vary. Please consult your local sales representative.
- Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions. Specifications and external appearance are subject to change without notice.
- The spectral response specified in this catalog is typical value, it is not guaranteed.

© 2019 Hamamatsu Photonics K.K.

## HAMAMATSU PHOTONICS K.K. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Systems Division

812 Joko-cho, Higashi-ku, Hamamatsu City, 431-3196, Japan, Telephone: (81)53-431-0124, Fax: (81)53-433-8031, E-mail: [export@sys.hpk.co.jp](mailto:export@sys.hpk.co.jp)

U.S.A.: Hamamatsu Corporation: 360 Foothill Road, Bridgewater, NJ 08807, U.S.A., Telephone: (1)908-231-0960, Fax: (1)908-231-1218 E-mail: [usa@hamamatsu.com](mailto:usa@hamamatsu.com)

Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany, Telephone: (49)8152-375-0, Fax: (49)8152-265-8 E-mail: [info@hamamatsu.de](mailto:info@hamamatsu.de)

France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 19, Rue du Saule Trapu, Parc du Moulin de Massy, 91882 Massy Cedex, France, Telephone: (33)1 69 53 71 00, Fax: (33)1 69 53 71 10 E-mail: [infos@hamamatsu.fr](mailto:infos@hamamatsu.fr)

United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited: 2 Howard Court, 10 Tewin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1BW, UK, Telephone: (44)1707-294888, Fax: (44)1707-325777 E-mail: [info@hamamatsu.co.uk](mailto:info@hamamatsu.co.uk)

North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB: Torshamnsgatan 35 16440 Kista, Sweden, Telephone: (46)8-509 031 00, Fax: (46)8-509 031 01 E-mail: [info@hamamatsu.se](mailto:info@hamamatsu.se)

Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.r.l.: Strada della Moia, 1 int. 6, 20020 Arese (Milano), Italy, Telephone: (39)02-93 58 17 33, Fax: (39)02-93 58 17 41 E-mail: [info@hamamatsu.it](mailto:info@hamamatsu.it)

China: Hamamatsu Photonics (China) Co., Ltd.: 1201 Tower B, Jiaming Center, 27 Dongsanhuan Beilu, Chaoyang District, 100020 Beijing, P.R.China, Telephone: (86)10-6586-6006, Fax: (86)10-6586-2866 E-mail: [hpc@hamamatsu.com.cn](mailto:hpc@hamamatsu.com.cn)

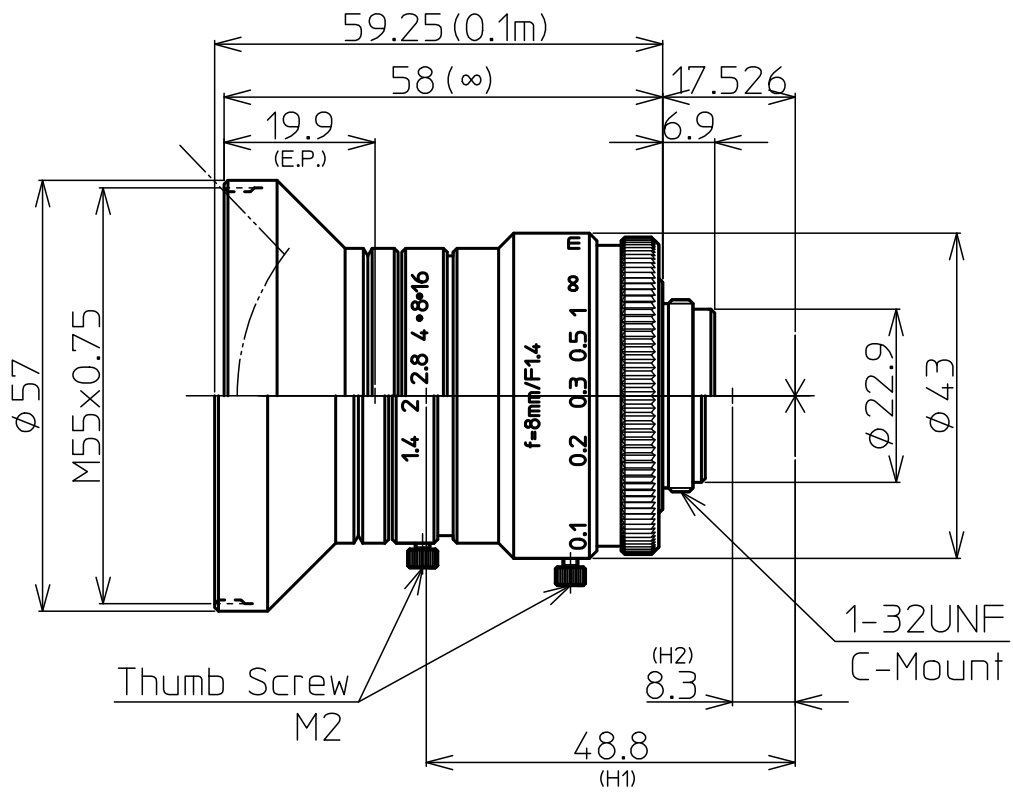
Taiwan: Hamamatsu Photonics Taiwan Co., Ltd.: 8F-3, No.158, Section2, Gongdao 5th Road, East District, Hsinchu, 300, Taiwan R.O.C. Telephone: (886)3-659-0080, Fax: (886)3-659-0081 E-mail: [info@hamamatsu.com.tw](mailto:info@hamamatsu.com.tw)

Cat. No. SCAS0111E06  
JUL/2019 HPK  
Created in Japan

## **ANEXO IX:**

### **DATASHEET LENTE CÁMARA INGAAS**





| 1" 1.4/8mm C                                   |            | 1"                  | 2/3"      | 1/1.8"             |
|------------------------------------------------|------------|---------------------|-----------|--------------------|
| FOCAL LENGTH                                   |            | f=8mm               |           |                    |
| MAX. DIAMETER (RATIO)                          |            | F=1:1.4~16          |           |                    |
| PICTURE SIZE                                   |            | 9.6x12.8mm          | 6.6x8.8mm | 5.4x7.2mm          |
| ANGLE                                          | VER. ANGLE | 63.0°               | 44.7°     | 36.9°              |
|                                                | HOR. ANGLE | 79.4°               | 58.3°     | 48.5°              |
|                                                | DIA. ANGLE | 92.4°               | 70.7°     | 59.5°              |
| DISTORTION (TV)                                |            | -1.2%               |           |                    |
| SHOOTING RANGE AT<br>MINIMUM FOCUS<br>DISTANCE | VER.       | 143.2mm             | 96.0mm    | 77.9mm             |
|                                                | HOR.       | 196.0mm             | 130.4mm   | 105.2mm            |
|                                                | DIA.       | 247.0mm             | 166.2mm   | 133.6mm            |
| MINIMUM FOCUS DISTANCE                         |            | 0.1m                |           |                    |
| FLANGE BACK                                    |            | 17.526mm in air     |           |                    |
| BACK FOCUS                                     |            | 11.2mm in air       |           |                    |
| FILTER SCREW SIZE                              |            | M55x0.75            |           |                    |
| FRONT/REAR EFFECTIVE DIA.                      |            | FRONT $\phi$ 37.4mm |           | REAR $\phi$ 17.5mm |
| MOUNT                                          |            | C-MOUNT             |           |                    |
| EXIT PUPIL                                     |            | -45.9mm             |           |                    |
| TEMPERATURE RANGE                              |            | -10~+50°C           |           |                    |
| STORAGE TEMPERATURE RANGE                      |            | -20~+60°C           |           |                    |
| RESOLUTION CENTER/CORNER                       |            | CENTER 100lp/mm     |           | CORNER 80lp/mm     |
| WEIGHT                                         |            | 205 g               |           |                    |

NOTE: Specifications and availability are subject to change without notice  
 注) 本仕様については、予告なしに変更する場合があります。



|            |       |     |               |      |             |
|------------|-------|-----|---------------|------|-------------|
|            |       | 尺度  | 1/1           | 工場番号 | HR975NCN-3H |
|            |       | 機種名 | 1" F1.4 f=8mm |      |             |
| 2014.12.25 | 更新    | 機種番 | LM8HC 外觀図     |      |             |
| 2013.4.15  | 作成年月日 |     |               |      |             |

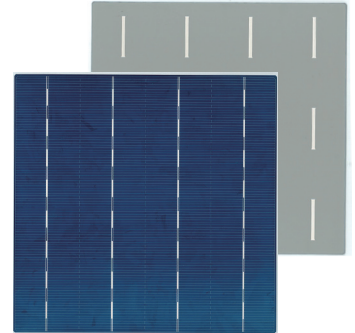
# **ANEXO X:**

## **DATASHEET CELULA SOLAR FOTOVOLTAICA**

# IM156B4

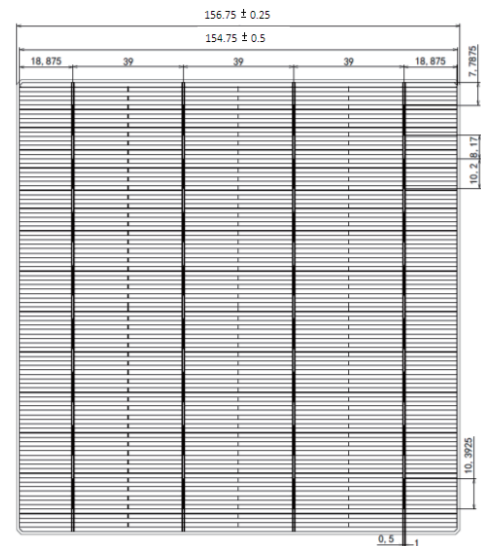
## Multicrystalline I-Cells

|                      |                                                                                                     |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dimension</b>     | 156.75mm x 156.75mm ± 0.25mm                                                                        |
| <b>Thickness(Si)</b> | 180µm ± 20µm, 200µm ± 20µm                                                                          |
| <b>Front</b>         | Blue silicon nitride anti-reflection coatings<br>1.0 mm hollow silver busbars                       |
| <b>Back</b>          | Full-surface aluminum back-surface field<br>2.0 mm (silver / aluminum) discontinuous soldering pads |



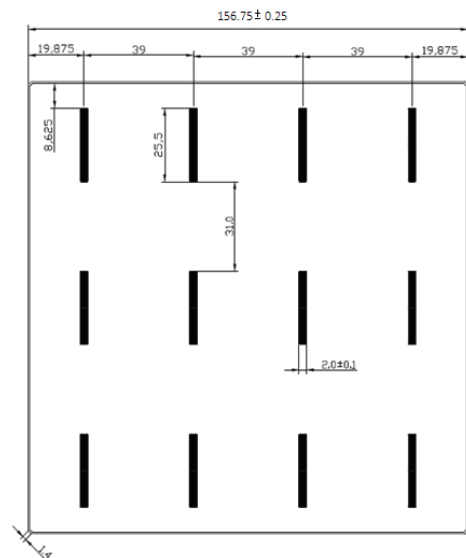
### ► Features

- > High conversion efficiencies resulting in superior power output performance
- > Outstanding power output even in low light or high temperature conditions
- > Optimized design for ease of soldering and lamination
- > Long-term stability, reliability and performance
- > Low breakage rate
- > Uniform Color



### ► Production and Quality Control

- > Precision cell efficiency sorting procedures
- > Stringent criteria for color uniformity and appearance
- > Reverse current and shunt resistance screening
- > ISO9001, ISO14001 and OHSAS 18001 certificated
- > Calibrated against Fraunhofer ISE



\* See the reverse side for more detail

**Electrical Performance**

| Efficiency Code              |        | 190   | 188   | 186   | 184   | 183   | 182   |
|------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Efficiency</b>            | Eff(%) | 19.00 | 18.80 | 18.60 | 18.40 | 18.30 | 18.20 |
| <b>Power</b>                 | Ppm(W) | 4.67  | 4.62  | 4.57  | 4.52  | 4.50  | 4.47  |
| <b>Max. Power Current</b>    | Ipm(A) | 8.54  | 8.49  | 8.45  | 8.40  | 8.38  | 8.36  |
| <b>Short Circuit Current</b> | Isc(A) | 8.99  | 8.96  | 8.92  | 8.89  | 8.87  | 8.85  |
| <b>Max. Power Voltage</b>    | Vpm(V) | 0.547 | 0.554 | 0.541 | 0.538 | 0.537 | 0.535 |
| <b>Open Circuit Voltage</b>  | Voc(V) | 0.645 | 0.643 | 0.640 | 0.638 | 0.637 | 0.635 |

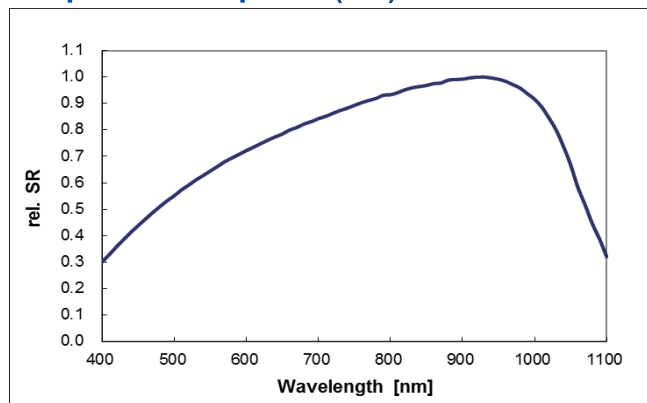
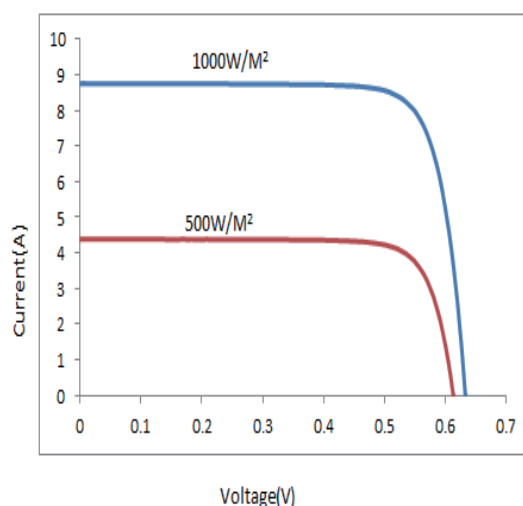
| Efficiency Code              |        | 181   | 180   | 178   | 176   | 174   | 172   |
|------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Efficiency</b>            | Eff(%) | 18.10 | 18.00 | 17.80 | 17.60 | 17.40 | 17.20 |
| <b>Power</b>                 | Ppm(W) | 4.45  | 4.42  | 4.37  | 4.32  | 4.28  | 4.23  |
| <b>Max. Power Current</b>    | Ipm(A) | 8.34  | 8.31  | 8.27  | 8.22  | 8.17  | 8.13  |
| <b>Short Circuit Current</b> | Isc(A) | 8.83  | 8.81  | 8.78  | 8.74  | 8.70  | 8.67  |
| <b>Max. Power Voltage</b>    | Vpm(V) | 0.534 | 0.532 | 0.530 | 0.527 | 0.524 | 0.521 |
| <b>Open Circuit Voltage</b>  | Voc(V) | 0.634 | 0.632 | 0.629 | 0.627 | 0.624 | 0.622 |

Standard test conditions: AM1.5, 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C. Average accuracy of all tested figures is ±1.5% rel.

**Temperature Coefficients**

|                                        |                |           |
|----------------------------------------|----------------|-----------|
| <b>Current Temperature Coefficient</b> | $\alpha(Isc)$  | 0.05%/°C  |
| <b>Voltage Temperature Coefficient</b> | $\beta(Voc)$   | -0.33%/°C |
| <b>Power Temperature Coefficient</b>   | $\gamma(Pmax)$ | -0.38%/°C |

Standard test conditions : AM1.5, 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C.

**Spectral Response(SR)**

**IV Curve**


Specifications subject to change without prior notice. MOTTECH reserves the rights of final interpretation and revision of this datasheet.

Feb 2017 Li1.4A M2\_04