

SISTEMA DE INSPECCIÓN MEDIANTE IMÁGENES DE LUMINISCENCIA DE MÓDULOS SOLARES EN FUNCIONAMIENTO

Del Río A.*, Moretón A.*, Barco R.*, Alonso V.*, Rebollo M.A.* Martínez O.* Jiménez J.***

*GdS Optronlab, Universidad de Valladolid, Paseo de Belén 19, Valladolid, 47011, Valladolid, España,
angel.moreton@uva.es

**Departamento de Física Aplicada, EIFAB, Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, 42004, Soria, España.

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2025>

RESUMEN

Los avances en la detección de defectos en módulos fotovoltaicos por luminiscencia se están viendo demorados por la necesidad que las técnicas de inspección actuales tienen de actuar sobre los contactos eléctricos y retirar los paneles de su estado de funcionamiento.

En el presente trabajo se introduce un sistema que vence esta limitación, pudiendo tomar imágenes de luminiscencia sobre módulos solares en funcionamiento. Dicho sistema se pone a prueba mediante la implementación de un primer prototipo funcional, con el que se toman imágenes de un string de células completo para poder compararlas con las obtenidas utilizando las técnicas de inspección actuales, determinando así sus similitudes y diferencias, y corroborando la validez del método propuesto.

PALABRAS CLAVE: Fotovoltaica, silicio, electroluminiscencia (EL), contactless, inspección, InGaAs.

ABSTRACT

Advances in the detection of defects in photovoltaic modules by luminescence are being delayed by the need that current inspection techniques have to act on the electrical contacts and remove the panels from their operating state. In the present work, a system is introduced that overcomes this limitation, being able to take images of luminescence on solar modules in operation. This system is put to the test by implementing a first functional prototype, with which images are taken of a complete string of cells to be able to compare them with those obtained using current inspection techniques, thus determining their similarities and differences, and corroborating the validity of the proposed method.

KEYWORDS: Photovoltaics, silicon, electroluminescence (EL), contactless, inspection, InGaAs.

INTRODUCCIÓN

La rápida expansión de instalaciones fotovoltaicas durante los últimos años ha dado lugar a nuevos desafíos y campos de investigación. La inspección de módulos fotovoltaicos instalados, además de necesaria para comprender los cambios de rendimiento ante las condiciones ambientales, así como para predecir la producción futura, es clave para proporcionar un suministro de energía confiable al consumidor. Por ello se hace de gran importancia avanzar en el conocimiento actual de los mecanismos de degradación en los módulos fotovoltaicos y en las tecnologías con las cuales se pueda observar esta degradación.

La inspección de módulos mediante imágenes de electroluminiscencia (ELi) es en la actualidad una de las herramientas más eficaces para la identificación de defectos en módulos fotovoltaicos (Köntges, et al. 2014). La realización de estas medidas precisa la polarización del módulo fotovoltaico en directa a su corriente de cortocircuito para posteriormente capturar mediante cámaras sensibles a la luz infrarroja la luminiscencia emitida. Estas dificultades técnicas que conlleva la captura de las imágenes de luminiscencia en el exterior (Jahn, et al. 2018) limitan este tipo de medidas, al disminuir notablemente los ratios de módulos medidos por jornada de trabajo.

De cara a solventar la ralentización que la desconexión, polarización y reconexión de los módulos fotovoltaicos, supone en el proceso de medida de ELi, este trabajo presenta un prototipo para la realización de estas medidas sin necesidad de desconectar los módulos fotovoltaicos ni polarizarlos.

INSPECCIÓN POR LUMINISCENCIA EN LA ACTUALIDAD

La obtención de imágenes de luminiscencia se basa en la emisión de fotones debida a la recombinación de portadores excitados en el interior de la célula solar. En el caso de la electroluminiscencia (ELi), la excitación de los portadores se lleva a cabo inyectando corriente a la célula. Por otro lado, la excitación se puede provocar por medio de una radiación incidente sobre la célula solar, en cuyo caso se obtiene una imagen de fotoluminiscencia (PLi) (Kasemann, et al 2008).

Estas técnicas se han consolidado entre los principales métodos para la detección de defectos en células y módulos de silicio cristalino (Munoz, et al 2011). Las imágenes obtenidas son visibles únicamente en el infrarrojo, debido a que a temperatura ambiente la emisión de luminiscencia del Silicio tiene lugar alrededor de los 1100 nm.

Para su captura es común emplear cámaras con detectores tipo CCD o CMOS de Silicio, debido a su alta resolución y coste relativamente bajo. Sin embargo, la eficiencia cuántica de estos detectores es muy baja a partir de los 1000 nm., obligando a trabajar en condiciones de oscuridad para evitar que la radiación ambiental perturbe la medida. Por este motivo, cada vez es más frecuente el uso de cámaras con detectores de InGaAs, cuya curva de eficiencia cuántica (Fig. 1) las sitúa más favorablemente en la captación de señal de luminiscencia en el rango del espectro deseado (Adams et al 2016).

A día de hoy existen multitud de técnicas de ELi y PLi según los niveles de excitación empleados, la presencia o no de luz solar en las medidas, o la disposición de la cámara, variando desde sistemas de trípode hasta la utilización de drones que sobrevuelan un elevado número de módulos fotovoltaicos.

Estas técnicas están evolucionando de cara a facilitar su implantación en la caracterización de las grandes cantidades de módulos de las plantas de generación fotovoltaica. Con motivo de evitar los riesgos asociados a la desinstalación de los paneles y posterior transporte, o a los derivados de la inspección de paneles durante la noche, en los últimos años se han perseguido técnicas in-situ que permitan llevar a cabo las medidas con los paneles expuestos a la luz solar (Guada et al 2020; Bhoopathy et al 2017; Stoicescu et al 2014).

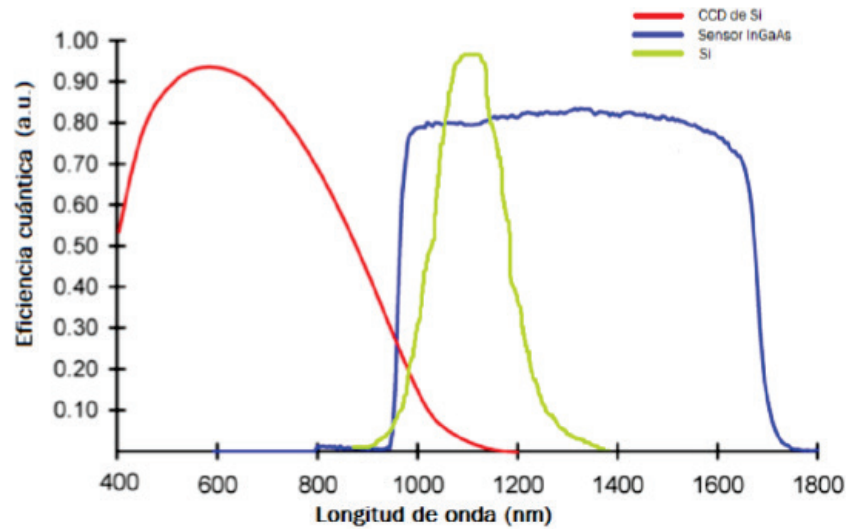


Fig. 1. Curvas de sensibilidad de los sensores de Si y de InGaAs, en relación a la curva de emisión del silicio.

MÉTODO DE MEDIDA CON EL PROTOTIPO

El sistema desarrollado que se presenta es capaz de realizar medidas de luminiscencia diurna en una planta fotovoltaica, utilizando como fuente de excitación luminosa la luz solar y con los paneles en funcionamiento.

El principio de luminiscencia empleado en las medidas se basa en la excitación con luz solar de la mitad de una célula y registrar la emisión de fotones en la otra mitad. Para ello se cubre la media célula en la que se quiere captar la luminiscencia con una caja, abierta por su parte inferior, en la que se introduce la cámara. La otra media célula recibe la excitación luminosa e induce a que se produzca una recombinación de portadores en el interior de la célula (Fig.2).

El hecho de que la media célula que no está siendo excitada directamente emita luminiscencia implica la existencia de una corriente de difusión, provocada por un gradiente de concentración de portadores. Es así que la clasificación de este proceso de luminiscencia no es inmediata: se podría considerar como EL, ya que la emisión de fotones es debida a esta corriente eléctrica de difusión, o como PL, ya que la fuente de excitación primaria es lumínica.

Por otro lado, para que los electrones y portadores se recombinen en cantidad suficiente para observar la luminiscencia, es necesario limitar la corriente en el grupo de células. Para ello se sombrea una segunda célula (célula de control) del mismo grupo de la célula observada. Esto hace que el diodo de bypass limite la corriente de los portadores generados y por consiguiente aumente su tasa de recombinación dando lugar a la emisión de luminiscencia.

No obstante, el resultado es todavía una señal de luminiscencia muy débil a la que se superpone la radiación solar que penetra por el cristal del módulo fotovoltaico. Esto hace que sean necesarios varios procesos de filtrado de la señal para obtener la luminiscencia emitida.

El primero de estos filtrados se basa en la colocación de un filtro óptico de paso de banda que solo deja pasar la luz con longitud de onda similar a la de la luminiscencia emitida por los módulos fotovoltaicos de silicio. El segundo de los procesos de filtrado consiste en obtener de las dos medias células a medir, una imagen de alta emisión de luminiscencia y otra de baja o nula emisión de luminiscencia, para posteriormente restar ambas imágenes y eliminar mediante la repetición de este procedimiento el ruido provocado por la luz ambiental.

La diferencia de emisión de luminiscencia entre las dos imágenes a restar se logra variando el valor de la corriente limitante debida al sombreado de la célula de control, esto es, consiguiendo que el medio que sombrea la célula de control varíe entre un estado translúcido y otro más opaco. Cuando se permite mayor paso de luz a la célula de control, el valor de la corriente limitante es más elevado y por tanto se produce menor recombinación de portadores, causando que la emisión de luminiscencia sea menor. Por el contrario, cuando el medio que sombrea la célula de control impide el paso de luz, el valor de dicha corriente se ve limitado consiguiendo así una mayor recombinación de portadores y una mayor señal de luminiscencia.

Para que la eliminación del ruido al restar las dos imágenes sea lo más efectiva posible, es preciso que la obtención de ambas imágenes sea lo más próxima posible en el tiempo, ya que las condiciones ambientales pueden cambiar de un instante a otro. Por ello se integra en un mismo software (Martínez Sacristán, et al. 2017) el control de los estados

de opacidad de los medios cobertores de la célula de control, junto con las operaciones de captura, de resta de las imágenes en los dos estados, y de adición de las imágenes resultantes repitiendo el procedimiento un determinado número de ciclos.

El producto obtenido será una imagen de luminiscencia de alta resolución de la media célula correspondiente. Repitiendo el proceso de medida sobre el resto del panel, se compondrá la imagen de luminiscencia del módulo fotovoltaico completo.

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

Los sistemas de medida empleados constan de los elementos que se muestran en la Fig. 2 y se describen a continuación:

- El panel solar de silicio cristalino a inspeccionar, que deberá estar en funcionamiento, conectado a un inversor desde el cual transportar la energía generada a la red.
- El prototipo propuesto.
- Una cámara CCD de InGaAs acoplada al prototipo, y acompañada de un adaptador de corriente para su alimentación.
- Un ordenador portátil desde el que visualizar la salida de la cámara, y con el software para realizar las medidas.
- Un dispositivo de control de polarización, controlable desde el software de medida, con un relé de estado sólido para conmutar entre los dos estados de polarización de los cristales electrocrómicos del prototipo.
- Una toma de corriente para la alimentación de la cámara, los cristales electrocrómicos y el ordenador, que podrá ser sustituida por un sistema de baterías.

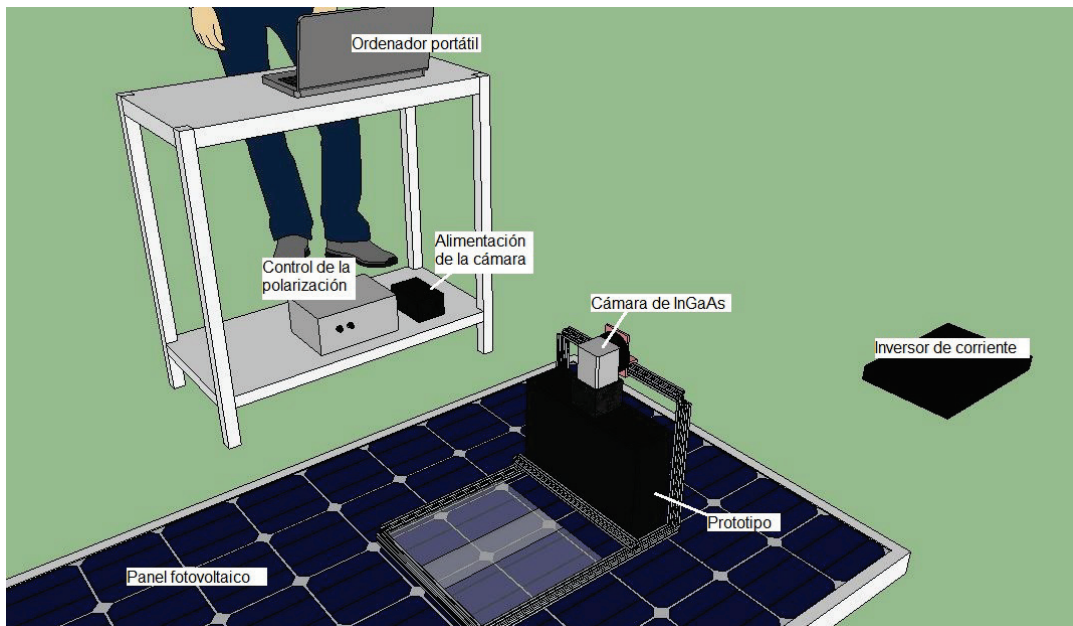


Fig. 2. Equipos del sistema de medida planteado.

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El prototipo diseñado responde a la necesidad de separar los procesos de inspección por luminiscencia de paneles fotovoltaicos en planta de la desconexión y manipulación de los módulos que generalmente lleva asociado, que suponen una de las mayores limitaciones de tiempo y seguridad de estas medidas.

En su descripción más general, el prototipo se compone de una carcasa, abierta por su parte inferior, que aisle de la luz solar a una o varias medias células, y de unos medios cobertores conmutables entre dos estados de opacidad que, dejando libres las medias células complementarias a las tapadas por la carcasa, recubra al menos otra célula del grupo de la anterior/es.

Entre las múltiples configuraciones disponibles, en la más preferente los medios cobertores son reproducidos mediante cristales electrocrómicos, unidos por estructuras rígidas a la carcasa, una caja negra dimensionada para cubrir dos medias células lateralmente adyacentes. Dicha configuración es la que se observa en la Fig. 2. Las estructuras se disponen también para permitir la fijación de la cámara al conjunto por medio de elementos de acople, integrados adicionalmente en el prototipo. El objetivo de la cámara queda alineado con un orificio en la cara superior de la caja, pudiendo así ver la media célula contenida en el interior, y se recubre completamente para impedir la interferencia de luz exterior.

Los cristales electrocrómicos consisten en láminas de polímero con cristal líquido cuyas fibras cambian de orientación en presencia de un campo eléctrico, permitiendo el paso de la luz a través del material. Al retirar el campo eléctrico, las fibras vuelven a reorientarse, volviendo a su estado de opacidad original.

En el estado actual del modelo, se necesita una toma de corriente para la alimentación de la cámara y la polarización de los cristales electrocrómicos. Los cables que conectan los distintos equipos, además de los elementos externos al prototipo, harían que la inspección de una gran cantidad de módulos resultase impráctica y costosa. Es por ello que de cara a configuraciones posteriores del prototipo, se plantea la integración de los distintos equipos del sistema de medida en el propio modelo, de forma similar a como se muestra en la Fig. 3.

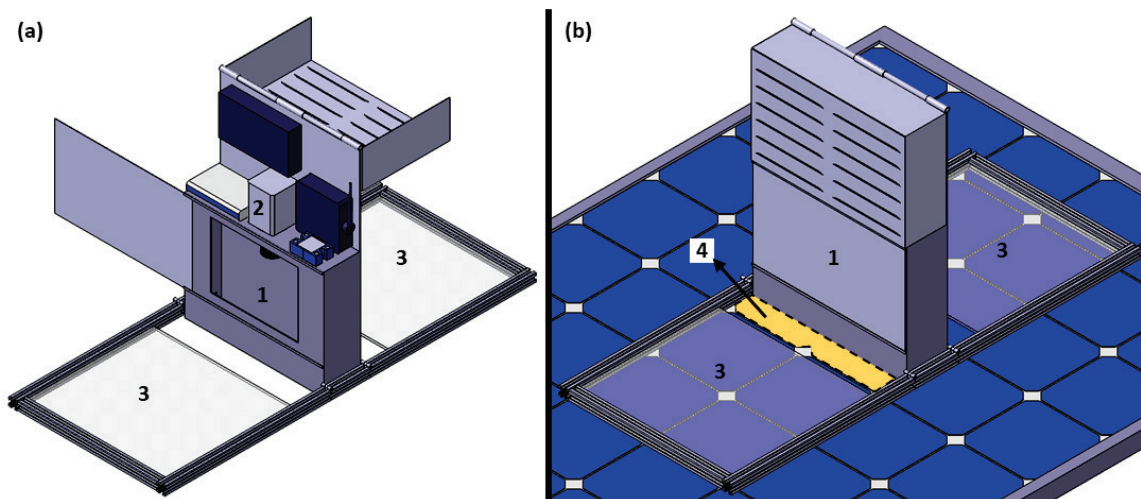


Fig. 3. Configuración futura del prototipo. (a) Prototipo abierto; (b) prototipo cerrado colocado sobre un módulo fotovoltaico; 1. Caja oscura; 2. Cámara; 3. Cristal electrocrómico; 4. Medias células excitadas por la radiación solar.

En la parte superior de la caja se incorporan la cámara, su fuente de alimentación, el dispositivo de control de polarización de los cristales electrocrómicos, un mini-PC con el software de medida y una batería recargable para dotar de autonomía al conjunto. De este modo, el prototipo podrá recorrer los distintos puntos del módulo fotovoltaico sin necesidad de cables externos. La disposición de cristales electrocrómicos a los dos lados de la caja facilitará este recorrido, permitiendo dividirlo en movimientos ortogonales simples, sin necesidad de girar el conjunto.

Finalmente, el operario podrá conectar de forma inalámbrica con el mini-PC desde un ordenador portátil, controlando cómodamente el lanzamiento de rutinas de medida y el movimiento del prototipo sobre la superficie del panel.

RESULTADOS OBTENIDOS

De cara a demostrar la validez del sistema planteado en la detección de defectos en células fotovoltaicas de Silicio cristalino, se han llevado a cabo diferentes medidas. En la Fig. 4 se presentan los resultados obtenidos en un panel de 20 células con una importante concentración de defectos. A modo comparativo, se presentan de igual manera en la Fig. 4 tanto las medidas realizadas con el sistema contactless, como las correspondientes imágenes de las mismas células empleando técnicas de ELi indoor y PLi con excitación solar.

De esta experiencia se determina que, si bien la calidad de la información obtenida por el sistema contactless varía entre unas medidas y otras, y en general no es tan clara como la que arrojan las imágenes de ELi y PLi, es posible discernir de forma eficaz defectos en las células de un módulo fotovoltaico en funcionamiento.

Como se puede constatar en la imagen, se pueden visualizar líneas, en las medidas por el sistema contactless, las líneas de cracks en las células. Aunque su presencia no sea siempre tan fácil de advertir como en las medidas de ELi y PLi, continúan siendo detectables, pudiéndose aplicar procesos de tratamiento de imagen adicionales que las distinguan más claramente.

Sin embargo, la respuesta de luminiscencia en zonas aisladas por cracks no siempre es la misma, dependiendo de la técnica utilizada. Por ejemplo, en la célula señalada como 5b, existen regiones oscuras en zonas que sí emiten luminiscencia en las medidas de EL y PL. El caso más llamativo se observa en la medida 4b, donde la célula izquierda se ve atípicamente oscurecida cuando en otras medidas sólo muestra los límites de grano del silicio cristalino. En medidas como la 7a, se da la situación de que las zonas oscuras y claras se invierten al comparar con la EL, mientras que en las mitades de debajo de las mismas células (7b) sí concuerdan en contactless y electroluminiscencia.

Por otro lado, en las medidas 6a y 6b, en las que la aparición de zonas oscuras no es muy acusada, se ven marcas de un defecto de sobrecalentamiento que se muestra de forma distinta en EL y PL, ocasionando regiones oscuras que, a diferencia con líneas de crack bien definidas, exhiben un patrón más irregular.

El principio de luminiscencia subyacente es primeramente comparable al de EL, ya que es la vía eléctrica de los portadores de carga que componen la excitación la que produce los contrastes en emisión de luminiscencia entre unas zonas y otras de las células. Sin embargo, la procedencia de estos portadores ya no son los contactos eléctricos, sino la corriente de difusión generada por la otra mitad de célula es por tanto razonable que las medidas disten en cierta manera de las obtenidas por EL convencional, siendo además necesario considerar la sensibilidad a la foto-excitación de los distintos puntos de las células de un modo similar a la PL.

TRABAJOS EN CURSO

Los paneles bifaciales (Luque 1979) son actualmente unas de las principales tendencias en la industria fotovoltaica. Debido a su mayor rendimiento (Janssen, 2015) con la misma superficie cada vez hay más instalaciones fotovoltaicas que utilizan paneles de este tipo, especialmente en emplazamientos con alto albedo como techos blancos, grava, etc., todo ello aun teniendo un coste superior al de los paneles tradicionales. Es por esto que se ha comenzado un nuevo desarrollo de un prototipo que, empleando los métodos de medida de la luminiscencia aquí explicados, sea capaz de realizar este tipo de medidas sobre módulos bifaciales por ambas caras de estos.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de inspección de paneles fotovoltaicos, denominado contactless, mediante medidas de Electroluminiscencia que no precisa la desconexión de los paneles del inversor para su polarización. Para su evaluación se han comparado las imágenes obtenidas mediante la técnica desarrollada con otras realizadas utilizando la Electroluminiscencia clásica y la Fotoluminiscencia. Los resultados obtenidos demuestran que es posible detectar

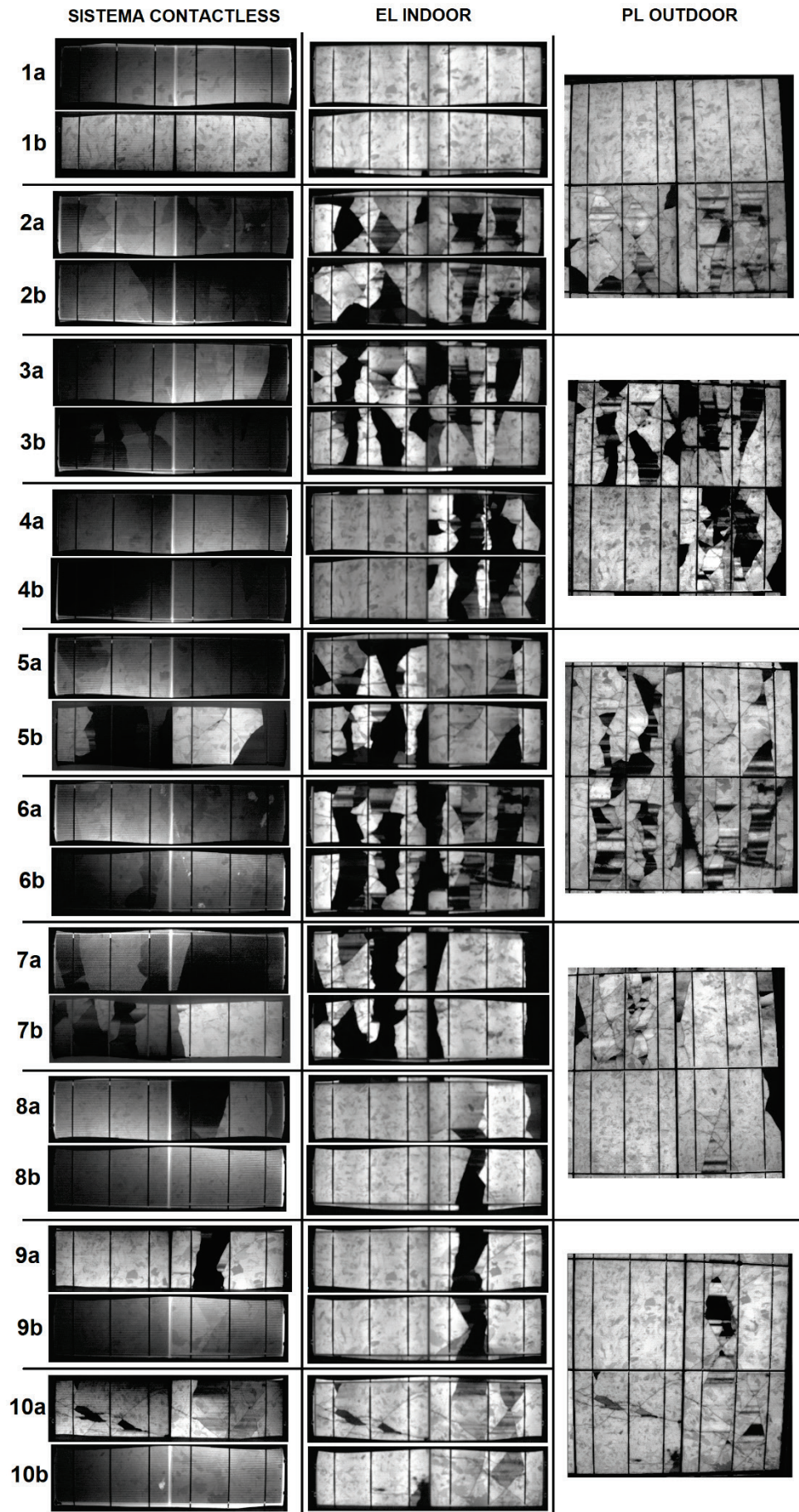


Fig. 4. Medidas de un string de células utilizando el sistema contactless, EL indoor y PL outdoor.

la mayor parte de los defectos, especialmente los asociados a cracks, mediante contactless. Sin embargo, se han encontrado algunas diferencias que afectan a zonas en las que la emisión de luminiscencia depende de la técnica utilizada.

AGRADECIMIENTOS

Proyectos ENE2017-89561-C4-R-3 y DOCTOR-PV. RETOS-2017. REF.: SRTC1700C006712XV0. Ministerio economía, industria y competitividad. Proyecto VA081U16. Junta de Castilla y León.

REFERENCIAS

Adams, J., et al. (2016). Non-stationary outdoor EL-measurements with a fast and highly sensitive InGaAs camera. *Proceedings of 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 21-24 June, Munich, Germany, pp 1837-1841.

Bhoopathy R., Kunz O., Juhl M., Trupke T., Hameiri Z. (2017). Outdoor photoluminescence imaging of photovoltaic modules with sunlight excitation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26, 69-73.

Guada M., Moretón Á., Rodríguez-Conde S., et al. (2020). Daylight luminescence system for silicon solar panels based on a bias switching method. *Energy Science & Engineering* 00, 1–15.

Jahn, U., et al. (2018). Review on infrared and electroluminescence imaging for PV field applications. *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 3.3: report IEA-PVPS T13-12:2018*.

Janssen, Gaby J.M., Van Aken Bas B., Carr Anna J., Mewe Agnes A., (2015) Outdoor Performance of Bifacial Modules by Measurements and Modelling. *Energy Procedia, Volume 77, pp 364-373*.

Kaseman, M., et al. (2008). Luminescence imaging for the detection of shunts on silicon solar cells. *Wiley InterScience* 16, 297-305.

Köntges, M., et al. (2013). Review on failures of photovoltaic modules. *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 3.2: report IEA-PVPS T13-01:2013*.

Luque A. (1979) Double-Sided Solar Cell With Self-Refrgerating Concentrator. *US4169738A*.

Martínez Sacristán, O., et al. (2017). Implementation of a Friendly Daylight Electroluminescence System for the Inspection of Solar PV Panels. *Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 25-29 September, Amsterdam, The Netherlands, pp 2021-2025.

Munoz, M.A., et al. (2011). Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. *Solar Energy* 85, 2264-2274.

Stoicescu L., Reuter M., Werner J. H. (2014). DaySy: Luminescence imaging of PV modules in daylight. *Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 22-26 September, Amsterdam, The Netherlands, pp 2553-2554.