

Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia

Study to detect Defects in Solar Panels by means of Electroluminescence

SALAZAR-PERALTA, Araceli†*, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda

Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Ingeniería en Materiales

ID 1^{er} Autor: *Araceli, Salazar-Peralta* / ORC ID: 0000-0001-5861-3748, Researcher ID Thomson: U-2933-2018, CVU CONACYT ID: 300357

ID 1^{er} Coautor: *J. Alfredo, Pichardo-Salazar*

ID 2^{do} Coautor: *Ulises, Pichardo-Salazar*

ID 3^{er} Coautor: *Rosa Hilda, Chávez*

Recibido Abril 27, 2018; Aceptado Junio 30, 2018

Resumen

En la industria fotovoltaica, las celdas solares se utilizan como el principal material semiconductor para la fabricación de paneles solares, en conexión serie y/o en paralelo, para integrar el módulo fotovoltaico completo. Las celdas solares pueden presentar defectos característicos, tales como micro grietas, dedos rotos, contactos defectuosos entre celdas, celdas con fisuras o celdas rotas, los cuales no son perceptibles a simple vista. La prueba de electroluminiscencia en la industria fotovoltaica, proporciona información de los defectos que se encuentran en las celdas solares. El objetivo de este estudio fue Identificar a través de la imagen de electroluminiscencia (EL), los defectos que se encuentran en las celdas solares. La prueba se realizó a los paneles, introduciendo un flujo eléctrico a través de las células solares en una cámara para electroluminiscencia. Los defectos encontrados en algunas celdas fueron: dedos cortados, microgrietas, celdas con fisura, lo cual repercutió en la reducción de potencia del módulo fotovoltaico. Se concluye que la técnica de electroluminiscencia, es una herramienta de utilidad para el aseguramiento de calidad en la fabricación de los módulos fotovoltaicos.

Electroluminiscencia, Módulo fotovoltaico, Celdas solares, Dedos cortados

Abstract

In the photovoltaic industry, solar cells are used as the main semiconductor material for the manufacture of solar panels, in series connection and / or in parallel to integrate the complete photovoltaic module. Solar cells can have characteristic defects such as micro cracks, broken fingers, defective contacts between cells, cells with cracks or broken cells, which are not visible to the naked eye. The electroluminescence test in the photovoltaic industry provides information on the defects found in solar cells. The objective of this study was to identify the defects found in solar cells through the electroluminescence (EL) image. The test was performed on the panels by introducing an electrical flow through the solar cells in an electroluminescence chamber. The defects found in some cells were: cut fingers, micro cracks, cracked cells, which affected the power reduction of the photovoltaic module. It is concluded that the electroluminescence technique is a useful tool for quality assurance in the manufacture of photovoltaic modules.

Electroluminescence, Photovoltaic module, Solar cells, Fingers cut

Citación: SALAZAR-PERALTA, Araceli, PICHARDO-SALAZAR, J. Alfredo, PICHARDO-SALAZAR, Ulises y CHÁVEZ, Rosa Hilda. Estudio para detección de defectos en Paneles Solares por medio de la Técnica de Electroluminiscencia. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-5: 1-9

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (araceli_salazar_p@hotmail.com)

Introducción

La necesidad de reducir los defectos, que puedan presentarse en la producción de módulos fotovoltaicos, conduce a realizar nuevos estudios, para mejorar la calidad de los mismos. Dentro del proceso de la producción, se presentan diferentes problemas, los cuales se ven reflejados en el producto terminado, así como en la vida útil del módulo. Para algunos de ellos existen métodos, que permiten detectarlos y corregirlos durante el proceso tales como mala soldadura, celdas rotas o defectos en la materia prima, pero hay problemas que solo se pueden ver con el paso del tiempo, y el deterioro del módulo (Ferrara. 2011).

El deterioro afecta la eficiencia que produce el módulo, a través de factores ambientales, por un mal manejo, o mantenimiento del mismo, se pueden llegar a hacer visibles, los defectos que trae a partir de su producción, entre estos defectos están los **dedos cortados**, que son las rupturas que presentan los colectores, de la celda. El proceso de soldadura y laminación, son los aspectos de mayor incidencia, que provocan defectos, de ahí la importancia, de estudiar los métodos y herramientas utilizados, para determinar los parámetros con los cuales se debe de trabajar, así mismo, como las características apropiadas del material (Hacke P. 2010).

La prueba de electroluminiscencia (EL), es una técnica de medición no destructiva que consta del mismo funcionamiento que un diodo emisor de luz. Esta prueba se realiza a los paneles solares, introduciendo un flujo eléctrico a través de las células solares. La EL es una técnica que sirve para caracterizar las células solares y el módulo fotovoltaico, es útil ya que es rápida, no destructiva, sensible a los efectos de los parámetros de resistencia y recombinación, de derivación y serie. La EL emitida por una célula solar en diagonal hacia adelante, puede ser detectada por una cámara de CCD en condiciones de oscuridad.

La prueba de electroluminiscencia, se realizó a los paneles solares, para poder identificar las celdas solares con defectos, a través de las imágenes EL. Estos defectos, que se encuentran en las células solares pueden provocar, una barrera para el flujo de la corriente eléctrica, y provocar una pérdida de potencia.

La importancia de realizar esta prueba, a los paneles solares, es poder identificar los defectos que no son visibles al ojo humano, y que pueden estar presentes en las celdas solares o en la soldadura, así como detectar los factores que generan la ruptura de los dedos (colectores), de la celda durante el proceso de fabricación, para implementar las posibles soluciones, y mejorar la calidad y la vida útil del módulo. En la Figura 1 se observan los componentes de un módulo fotovoltaico: Cristal de vidrio templado, Etilen vinil Acetato (EVA), Células de alto rendimiento, marco de aluminio, Back Sheet, EVA, y caja de conexiones.

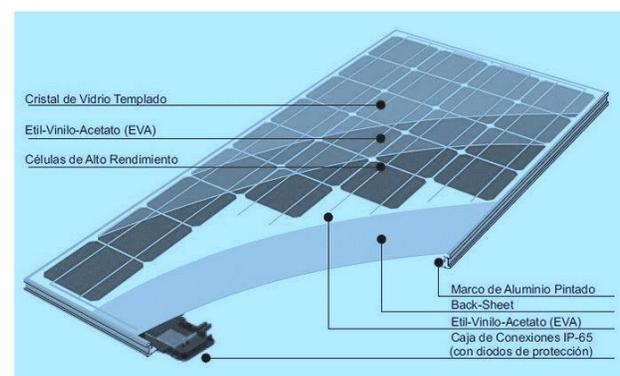


Figura 1 Capas componentes de un Módulo Fotovoltaico. Parte superior: Cristal de vidrio templado, Etilen vinil Acetato (EVA), Células de alto rendimiento. Parte inferior: Marco de aluminio, Back Sheet, EVA, y Caja de conexiones

Fuente: *Elaboración Propia*

Vidrio templado

Vidrio templado de sosa, cal y sílice con un espesor entre 3 y 4 mm, con bajo contenido de hierro. Este tiene muy buena transmisión de la radiación solar, además de proporcionar protección, contra los agentes atmosféricos, y los impactos. La superficie exterior del vidrio, es anti reflexiva y está tratada para impedir la retención del polvo, y la suciedad. La superficie interior, generalmente es rugosa, lo que permite una buena adherencia con el encapsulante de las células, además de facilitar la penetración de la radiación solar.

Celda solar

Las celdas solares, son dispositivos de conversión directa, que transforman directamente, sin procesos intermedios la potencia proveniente del sol en potencia eléctrica (DC).

Puesto que la potencia $P=IV$, es necesario comprender como se genera la corriente I y el voltaje V en la celda. A su vez, I es el resultado de cargas en movimiento en una dirección determinada. Las cargas, son inherentes al material, pero en los semiconductores, están en estado ligado. Bajo la acción de la luz, las cargas se vuelven libres, capaces de formar una corriente. Las cargas son dirigidas en una dirección determinada, para formar una corriente, gracias a la acción de campo eléctrico creado en la celda. En la Figura 2 se observan los componentes de la celda, los cuales son: Superficie de contacto, Recubrimiento antirreflexión, Silicio tipo n, Silicio tipo p, Silicio tipo p+, Parte posterior.

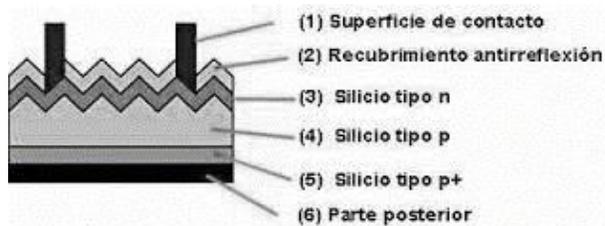


Figura 2 Componentes de la celda solar; (1) Superficie de contacto, (2) Recubrimiento antirreflexión, (3) Silicio tipo n, (4) Silicio tipo p, (5) Silicio tipo p+, (6) Parte posterior
Fuente: Elaboración Propia

La estructura física, o arreglo atómico, de los semiconductores, se puede dividir en tres grupos: Cristal simple, policristalino y amorfo. La estructura de cristal simple se caracteriza por un ordenamiento periódico de átomos obteniendo una forma geométrica, tridimensional de un paralelepípedo. Tal es el caso del Silicio, el cual comparte cada uno de sus cuatro electrones de valencia, en una unión covalente, con cada átomo vecino de silicio, el sólido, por lo tanto, consiste en una unidad básica de 5 átomos de silicio, el átomo original más los cuatro átomos con los que comparte sus electrones de valencia.

Componentes del Módulo Fotovoltaico: Celda solar

- Placa de silicio dopada con Fosforo y Boro para así obtener un lado positivo y un lado negativo.
- Capa anti reflectante con forma de cono o pirámides que capturan con mayor facilidad los rayos del sol.
- Rejillas o dedos encargados de recolectar las cargas producidas en la celda solar.

Bussbar

El Bussbar es el principal colector, pasa en la parte negativa y positiva de la celda, donde se une el ribbon para formar cadenas de celdas.

EVA

Se emplean dos capas de Etil-Vinil-Acetato (EVA) entre la matriz de celdas. Este copolímero se encuentra en contacto directo con las células, de manera que protege las conexiones entre las mismas, y aporta resistencia contra las vibraciones e impactos. Además, permite la transmisión de la radiación solar, y no se degrada con la radiación ultravioleta.

Back-sheet (Tedlar)

Se utiliza comunmente un laminado de tres capas. La capa externa es de fluoruro de polivinilo (PVF), comercialmente denominado TEDLAR. Este material, junto con la cubierta frontal, protege al módulo de la humedad y otros agentes atmosféricos, sin embargo, no lo aísla eléctricamente, para ello se utiliza una segunda capa de poliéster (Tereftalato de Polietileno). En la parte interna se usa otra capa de TEDLAR. Esta lámina de plástico de material compuesto es de naturaleza opaca, habitualmente de color blanco, para reflejar la luz solar, que no almacenan las celdas sobre la cara posterior rugosa de la cubierta frontal, la cual refleja la luz de nuevo hacia las celdas.

Dedos Colectores de la celda solar

Con el fin de recolectar las cargas que se generan por la radiación solar, la celda trae consigo contactos a través de la superficie, normalmente son tiras de metal, en forma de rejillas llamados dedos. En la Figura 3, se observan los dedos colectores, uno de ellos está marcado por medio de un rectángulo.

Sin embargo, si se coloca una rejilla grande, la cual es opaca, en la tapa de la celda, ocasionaría sombra a las partes activas de la misma, y por lo tanto se reduciría la eficiencia de conversión, en forma considerable. Para mejorar la eficiencia de conversión, se debe reducir al mínimo estos efectos que ensombrecen la superficie de contacto, con los rayos solares.

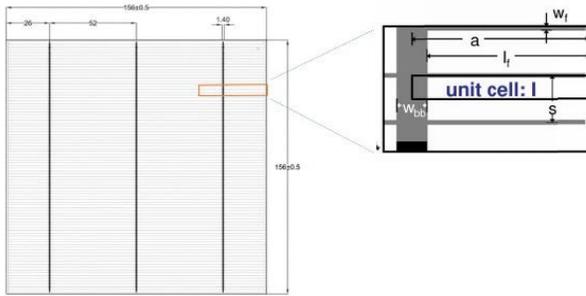


Figura 3 Dedos colectores de una celda solar (marcada con el rectángulo).

Fuente: *Elaboración Propia*

Dedos Cortados

Son rupturas que presentan los colectores de la celda. Se considera ruptura, cuando los dedos colectores se fracturan, ya sea entre ellos o del bussbar, si esto sucede impedirán el flujo de corriente, que genera la celda provocando la pérdida de esa energía, disminuyendo la potencia del módulo.

Esta pérdida puede verse a través de un equipo llamado cámara de electroluminiscencia, que sirve como parte de la inspección de calidad del módulo, el cual induce una corriente eléctrica, sobre el módulo provocando que este brille, una vez hecho esto por medio de una cámara monocromática, equipada con filtro para bloquear la luz visible, se toman las imágenes, en las cuales se pueden detectar grietas, celdas rotas, y problemas de soldadura.

La cámara para la prueba de electroluminiscencia, produce imágenes, en donde se puede apreciar cuando una celda hace mal contacto, en este caso genera un brillo, lo cual se identifica como falta de soldadura, también aparecen manchas oscuras, las cuales representan ruptura de colectores, y así mismo se pueden ver las celdas rotas.

Cabe mencionar que las imágenes obtenidas en la cámara de electroluminiscencia, no dan mayores detalles, solamente dan zonas brillantes en el caso de falta de soldadura, y en el caso de colectores rotos zonas oscuras, como las que se observan en la figura 4. En esta figura se observa una celda sin defecto, y otra con defecto de dedos cortados. El inspector de aseguramiento de calidad, se debe capacitar y familiarizar con la prueba, para poder determinar el defecto.

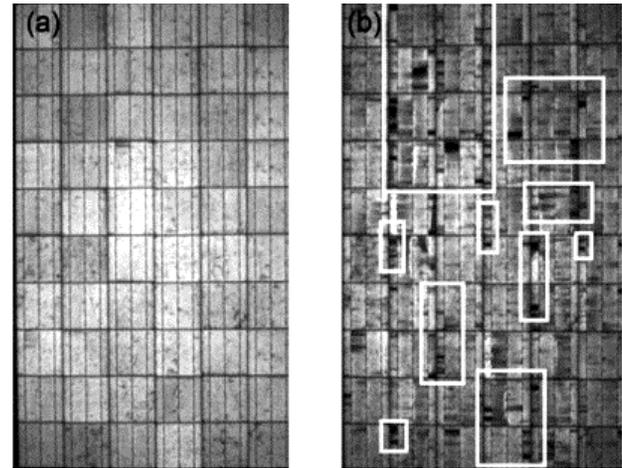


Figura 4 Prueba comparativa de Electroluminiscencia (EL) de un módulo sin defecto (a) y otro con dedos colectores con defecto (cortados) (b). Cabe mencionar que los defectos aparecen como manchas oscuras en la Cámara de Electroluminiscencia

Fuente: *Cámara de Electroluminiscencia*

El Desarrollo de este trabajo se dividió en 6 secciones en la siguiente secuencia:

1. **Introducción.** En la cual se abordan los conceptos generales necesarios, para comprender todo lo relacionado con un módulo fotovoltaico, sus partes, así como la celda solar, su constitución y los defectos que puede presentar, lo cual influye en forma directa en la potencia del módulo.
2. **Experimentación.** En esta sección se explica la metodología a seguir para la medición de electroluminiscencia en el módulo.
3. **Análisis de Resultados.** En esta sección se aborda la discusión de los resultados encontrados.
4. **Conclusiones.** En esta sección se indican las conclusiones de este estudio.
5. **Agradecimientos.** En esta sección se agradece a las Instituciones que permitieron llevar a cabo el estudio.
6. **Referencias.** Finalmente se presentan las referencias consultadas.

Experimentación

La prueba de electroluminiscencia se realizó en una máquina para ensayo de luminiscencia marca Flasher, tomando en consideración los siguientes aspectos:

- 2.1 La Electroluminiscencia es la emisión de luz por parte de un material, cuando es sometido a la aplicación de un voltaje, es un fenómeno que se relaciona con los electrones salientes, generados por la existencia de un alto campo eléctrico en el dispositivo. Ver Figura 5.

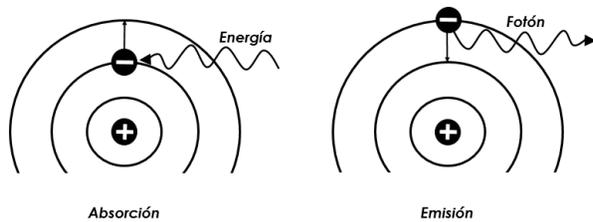


Figura 5 Fenómeno del electrón cuando emite y absorbe energía

Fuente: *Elaboración Propia*

La electroluminiscencia ocurre cuando los electrones cruzan la unión desde el material tipo **n** al tipo **p** el proceso de recombinación, electrón-hueco, produciendo algunos fotones en el rango visible o infrarrojo (IR), lo cual se observa en la Figura 6.

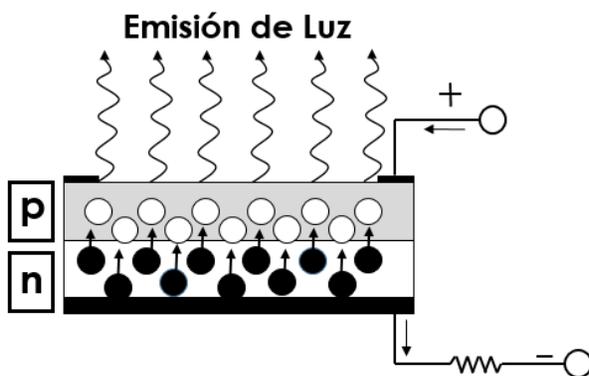


Figura 6 Emisión de luz de un semiconductor np

Fuente: *Elaboración Propia*

Los electrones cruzan la unión desde el material tipo **n** al tipo **p** el proceso de recombinación, electrón-hueco, produce algunos fotones (luz) en el rango visible o infrarrojo.

- 2.2 Se verificó que la máquina Flasher estuviera calibrada.
- 2.3 Se colocó el panel en la máquina Flasher
- 2.4 Se introdujo un flujo eléctrico a través de las celdas solares.

- 2.5 La electroluminiscencia emitida por una celda solar se produjo conforme al siguiente principio. Las células solares, son sometidas a una corriente eléctrica que excita a los electrones del silicio lo que provoca la emisión de fotones que son detectados a través de una cámara CCD (Dispositivo de carga acoplada). Ver Figura 7.

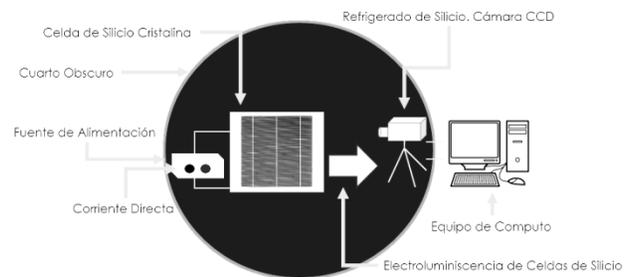


Figura 7 Principio del fenómeno de electroluminiscencia. Las células emiten una luz que es captada por la cámara de electro luminiscencia. Las que no tienen defecto aparecen brillantes en la imagen de la cámara, las que están dañadas mostrarán un color oscuro (mancha).

Fuente: *Manual de EL*

- 2.6 Se proyecta la imagen de electroluminiscencia del módulo PV (potencia voltaje) permitiendo identificar algunos defectos y características en las celdas solares que serían imperceptibles para el ojo humano. Dentro de los defectos que se pueden detectar por esta prueba son:
 - 2.6.1 Micro fisura (Micro crack): Fisuras en forma de líneas, no son visibles al ojo humano. Ver Figura 8.

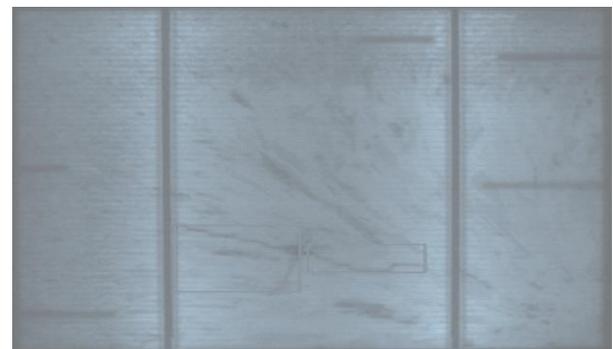


Figura 8 Imagen de Electroluminiscencia (EL) de un Módulo con microfisuras (líneas oscuras)

Fuente: *Cámara de Electroluminiscencia*

- 2.6.2 Fisura activa (active crack): Fisuras que se caracterizan por tener una región oscura a un lado, causando pérdida de la potencia. Ver Figura 9.

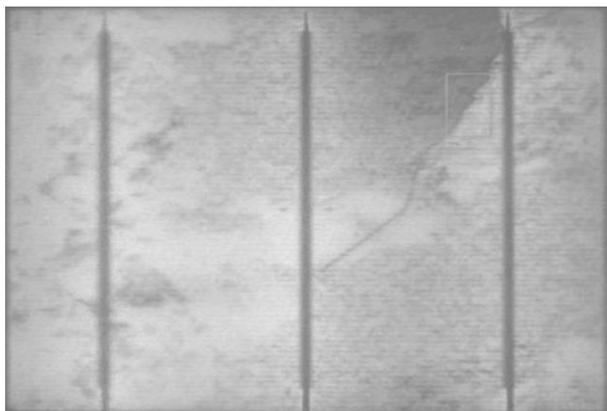


Figura 9 Imagen de electroluminiscencia (EL) de un Módulo con Fisura activa (parte superior derecha)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.6.3 Dedos cortados: Impresión defectuosa de la celda, los dedos están interrumpidos. No son demasiados como para ocasionar regiones oscuras. Figura 10.

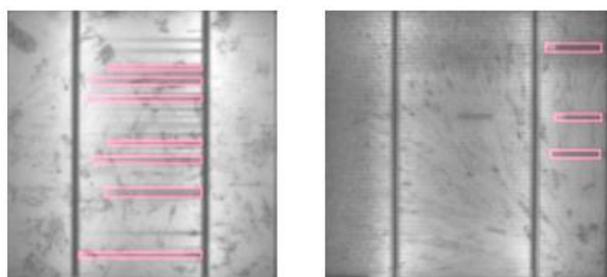


Figura 10 Imágenes por Electroluminiscencia de Módulos con defecto de dedos cortados (manchas oscuras, señaladas con rojo)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.6.4 Dedos interrumpidos (cortados), que forman una mancha: Varios dedos están interrumpidos ocasionando una región oscura. Ver Figura 11

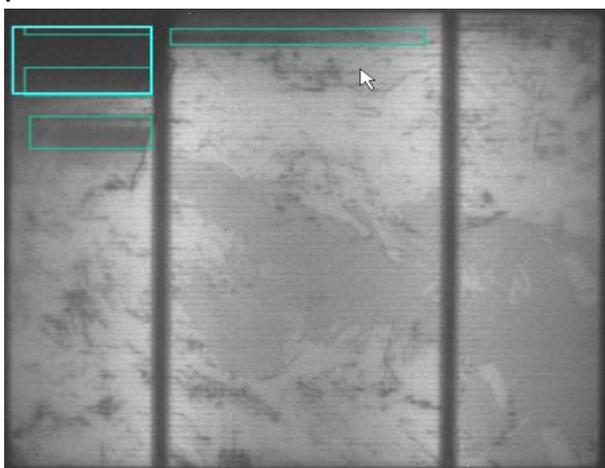


Figura 11 Imagen por Electroluminiscencia (EL) de un Módulo con dedos interrumpidos, los cuales forman una mancha (rectángulo marcado con verde)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.6.5 defecto por brillo: Se ocasiona por una mala soldadura
 - a. Todos los ribbons están mal soldados
 - b. El ribbon derecho está mal soldado. Ver Figura 12.

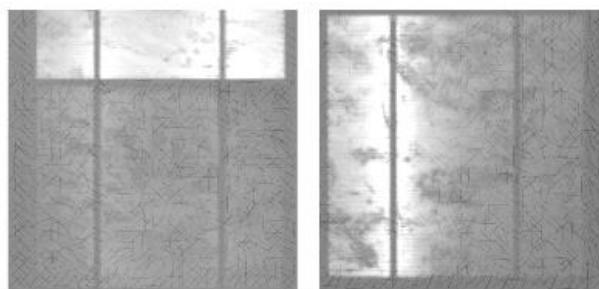


Figura 12 Imágen por Electroluminiscencia (EL) de un módulo con defecto por brillo ocasionado por mala soldadura

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.6.6 Manchas oscuras ocasionadas por:
 - a. Fallos de soldadura (Ribbon izquierdo)
 - b. Defecto de la celda
 - c. Rotura en la orilla. Ver Figura 13.

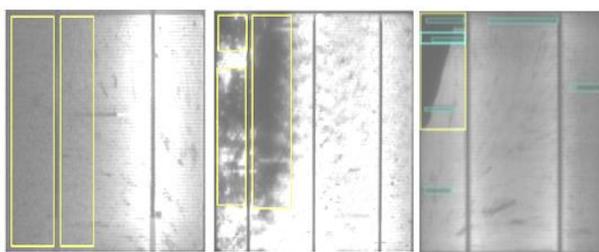


Figura 13 Imágenes de Electroluminiscencia de Módulos con manchas oscuras. a) Falla en soldadura, b) Defecto de celda, c) Rotura

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

- 2.7 Las imágenes obtenidas por Electroluminiscencia (EL) de cada módulo fotovoltaico probado, se guardan en un equipo de cómputo para ser analizadas con detalle posteriormente.

Análisis de Resultados

De los 6 módulos probados en este estudio se encontraron 2 con los siguientes defectos: Uno con microfisura y otro con dedos cortados. Ver Figura 14, y 15. Cabe mencionar que la potencia de los módulos se vió afectada, los dos módulos estuvieron fuera de especificación.

- 3.2 La prueba de Electroluminiscencia ofrece una gran cantidad de datos sobre la uniformidad del área de las células que conforman el módulo solar. Es no destructiva y relativamente rápida de efectuar con tiempos de medición de 1 segundo posible.

Para detectar posibles defectos que pueden afectar el rendimiento del módulo, se aplica un voltaje en las terminales de los módulos y estos responden mediante una recombinación de los electrones en las celdas, produciendo una radiación de fotones. Las áreas dañadas del módulo solar aparecen oscuras o brillan menos que las áreas que están en buen estado. La emisión de luminiscencia es detectada por la cámara al silicio, un dispositivo con carga acoplada (CCD) con una resolución de pixel de 1376×1040 .

Este estudio permitió determinar el fenómeno llamado dedos cortados en los módulos fotovoltaicos, problema que influye directamente en la eficiencia, y utilidad de los módulos, ocasionado por el rompimiento de los colectores, que trae consigo la serigrafía de la celda solar. Los colectores al no hacer contacto con los interconectores del módulo, impiden el flujo de energía, y al mismo tiempo reducen la potencia generada por el modulo.

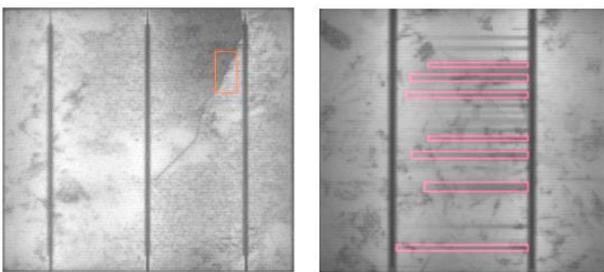


Figura 14 Imágenes por Electroluminiscencia de Módulos fotovoltaicos con defectos. a) fisura activa (izquierda). b) Dedos cortados (derecha)

Fuente: Cámara de Electroluminiscencia

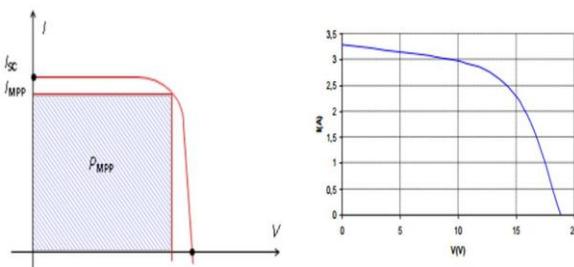


Figura 15 Comparación de la curva I-V. De un módulo sin defecto, y otro con defecto.

Fuente: IUSA

Conclusiones

La implementación de la prueba de electroluminiscencia en la producción de los paneles solares es uno de los pasos más importantes en todo el proceso. Esta prueba permite detectar los defectos durante el proceso y corregirlos, enviando el panel a reparación antes de enviarlo al cliente. La detección oportuna de los defectos que pueda tener el panel solar, ayudará a reducir el PNC (Producto no conforme), ocasionado por defectos en las celdas solares tales como: micro-fisuras, defectos invisibles de soldadura, y otros daños de los módulos fotovoltaicos, que no son visibles y no pueden ser detectados a simple vista.

Este estudio permitió conocer los defectos presentes en las celdas solares que conforman el módulo fotovoltaico, los cuales pueden ser ocasionados por las siguientes causas:

- Materia prima. Se debe verificar si cumple con las especificaciones al recibirla del proveedor.
- Tipo de almacenaje. Las celdas fotovoltaicas por lo general de fábrica vienen empaquetadas en una caja especial para evitar que se dañe, y como es material frágil se debe de tener especial cuidado durante su manejo, desde la recepción hasta el almacenaje.
- Área de producción. Se debe tener especial cuidado en los siguientes parámetros.
- Coeficiente de Dilatación Térmica (CTE) superficial causado por el espesor del ribbon.
- Falta de uniformidad en la soldadura. Puede ser exceso de penetración o falta de penetración.
- En general se deben controlar todos los parámetros de la máquina soldadora, así como la temperatura ambiente.

Se recomienda implementar controles por medio de hojas de inspección en cada etapa de fabricación, desde la recepción de la materia prima hasta el final del proceso para asegurar que el módulo llegue al cliente dentro de especificación.

Agradecimientos

Al Tecnológico de Estudios Superiores por la Vinculación Academia Industria y las horas de Investigación asignadas para este estudio en colaboración con Industrias Unidas S.A de C.V

Referencias

C. Ferrara, "Philip Why do PV Modules Fail, in: Proceedings of the Inter-national Conference on Materials for Advanced Technologies, Singapore", Energy Procedia 15, 2011, 379–387.

P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, D. Turdell, N. Bosco, S. Johnston, S. Kurtz, "Test-to-Failure of Crystalline Silicon Modules", in: Proceedings of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, 2010, pp. 248–250.

A. Gabor, M. Ralli, S. Montminy, L. Alegria, C. Bordonaro, J. Woods, L. Felton, "Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules", Proceedings of the 21st EUPVSEC, Dresden, Germany, 2006, pp. 2042–2047.

A. Schneider, M. Pander, T. Korvenkangas, S. Aulehla, R. Harney, T. Hort-tana, "Cell to Module Loss Reduction and Module Reliability Enhancements by Solder Ribbon Optimization", Proceedings of the 29th EUPVSEC, Amsterdam, Netherlands, 2014, pp. 165-170.

I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser, B. Bjørneklett, "Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks," Solar Energy Materials and Solar Cells 95, 2011, pp. 1131-1137.

A. Halm, V. Mihailetchi, G. Galbiati, L. Koduvelikulathu, R. Roescu, C. Comparotto, R. Kopecek, K. Peter, J. Libal, "The Zebra cell concept - large area n-type interdigitated back contact solar cells and one-cell modules fabricated using standard industrial processing equipment", Proceedings of the 27th EUPVSEC, Frankfurt am Main, Germany, 2012, pp. 567-570.

ASTM E 1040 (12.02) Physical Characteristics of Non concentrator Terrestrial photovoltaic Reference Cells. Specification for.

ASTM E 1328 (12.02) Relating to Photovoltaic Solar Energy Conversion, Terminology.

Barrera, P. (2009). "Simulación y caracterización de celdas solares multi-juntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales." (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional de General San Martín Comisión Nacional de Energía Atómica Instituto de Tecnología. República Argentina

Barrera, Fernández., (2010). Energía Solar. Energía Fotovoltaica Madrid: Liberfactory.

M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert, M. Karraß, R. Lippmann, M. Broddack and D. Wald, "Influence of manufacturing processes and sub-sequent weathering on the occurrence of cell cracks in PV modules," Proceedings of the 28th EUPVSEC, Paris, France, 2013, pp. 3275-3279.

Duran, J. C., Bruno, C. J., y Bolzi, C. G. (2002). "Convenio de cooperación CONAE-CNEA: Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas." Profesional Independiente, 20(1), 0329-5184.

Cengel, Y., y Hernán, P. J. (2004). "Transferencia de calor". México: McGraw-Hill

E. Wang, J. Yen, H.E. Yang, S. Chi, C. Wang, Failure modes evaluation of PV module via materials degradation approach, Energy Procedia 33 (2013) 256-264.

K.K.J. Lee, J. Park, K. You, H. Ahn, D. Han, Electrical characteristics of PV module according to optical characteristics of back-sheet, Korean Sol. Energy Soc. 11 (2008) 45-47.

R. Kahtri, S. Agarwal, I. Saha, S.K. Singh, B. Kumar, "Study on Long Term Reliability of Photovoltaic Modules and Analysis of Power Degradation Using Accelerated Aging Tests and Electroluminescence Technique", in: Proceedings of the 1st International Conference on Silicon Photovoltaics, Frei-burg, Energy Procedia 8, 2011, 396–401.

S. Kajari-Schroder, I. Kunze, U. Eitner, M. Köntges, Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests, Solar Energy Materials and Solar Cells 95 (2011) 3054–3059.

Solar Energy Materials & Solar Cells 95 (2011) 1131-1137: The risks of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to microcracks, [M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser, B. Bjorneklett].