



Listas de contenidos disponibles en [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## Análisis de fallas de ingeniería

revista Página de inicio: [www.elsevier.com/locate/engfailanal](http://www.elsevier.com/locate/engfailanal)



# Investigación y análisis de roturas de dedos en módulos fotovoltaicos de silicio cristalino comerciales bajo prueba de ciclo térmico estándar



Subinoy Roy<sup>\*</sup>, Sagarika Kumar, Rajesh Gupta

Departamento de Ciencia e Ingeniería de la Energía, Instituto Indio de Tecnología de Bombay, Mumbai, India

### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

#### Palabras clave:

Módulo fotovoltaico

Rotura de dedos

Prueba de ciclo térmico

Imágenes de electroluminiscencia

Modelo de diodo distribuido

Análisis de fallas

### ABSTRACTO

Los dedos de la rejilla frontal juegan un papel importante en la conducción de corriente en módulos fotovoltaicos (PV) de silicio cristalino. Estos dedos generalmente se rompen con el tiempo durante la exposición al campo, lo que afecta la integridad mecánica y eléctrica de los módulos y provoca una reducción en su rendimiento. En este artículo, se ha presentado una metodología sistemática para la investigación de la naturaleza y evolución de las roturas de dedos observadas en módulos de tecnología fotovoltaica de silicio cristalino bajo pruebas estándar de ciclos térmicos como se especifica en la norma IEC 61215. El análisis de corriente-voltaje (IV) iluminado y las técnicas de imagen de electroluminiscencia (EL) se han utilizado en conjunto para investigar la causa, los tipos y la progresión de las roturas de los dedos. Los resultados obtenidos del estudio identificaron varias configuraciones de soldadura defectuosas que son sensibles a la fatiga térmica y, posteriormente, causan roturas en los dedos. Se ha introducido un método generalizado para cuantificar las roturas de los dedos a partir de imágenes EL. Los diferentes patrones de rotura de los dedos se han clasificado según su aparición en las imágenes EL originadas por la rotura de las uniones barra-dedo. También se han realizado modelos y simulación de diodos distribuidos para la cuantificación de la gravedad de diferentes patrones de rotura de dedos. Además, se ha propuesto una constante de rotura de dedos para la evaluación comparativa de la durabilidad de los dedos en módulos fotovoltaicos en condiciones de prueba de ciclos térmicos.

## 1. Introducción

Una estructura de módulo fotovoltaico (PV) consiste en un conjunto empaquetado de células solares interconectadas, donde cada parte juega un papel importante en el mantenimiento de su rendimiento general. En los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino comerciales, los dedos de la rejilla frontal en las celdas permiten la recolección de la corriente generada en la celda hacia las barras colectoras y también acomodan la recolección de regiones alejadas de las barras colectoras. De esta manera, los dedos contribuyen a mantener la integridad eléctrica dentro de un módulo. Cualquier daño estructural a los dedos en la etapa de fabricación o bajo condiciones ambientales adversas en el campo induce grietas en ellos, que generalmente se denominan roturas de los dedos. La rotura de dichos dedos afecta la conducción de corriente en el módulo, lo que aumenta la resistencia en serie y disminuye el factor de llenado que finalmente reduce el rendimiento del módulo.<sup>1,2]</sup>

<sup>\*</sup> Autor correspondiente.

Dirección de correo electrónico: [subinoy@iitb.ac.in](mailto:subinoy@iitb.ac.in) (S. Roy).

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.031>

Recibido el 30 de diciembre de 2017; Recibido en forma revisada el 11 de marzo de 2019; Aceptado el 27 de marzo de 2019

On-line el 28 de marzo de 2019

1350-6307 / © 2019 Elsevier Ltd. Todos los derechos reservados.

Las roturas afectan la estabilidad mecánica de los dedos, lo que dificulta su capacidad de transporte de corriente y, por lo tanto, reduce el rendimiento general y puede provocar fallas prematuras en los módulos.

En el escenario actual, cuando se están realizando enormes instalaciones de módulos basados en tecnología fotovoltaica de silicio cristalino, la detección y el análisis de las fuentes de fallas prematuras es un aspecto importante. Para poder abordar una parte importante de esta preocupación, existe la necesidad de un análisis en profundidad de las roturas de los dedos en los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino comerciales. Con el fin de facilitar la fatiga térmica dentro de los módulos fotovoltaicos, la norma IEC 61215 prevé una prueba de ciclos térmicos (TC) que verifica la capacidad de los módulos para resistir el desajuste termomecánico producido debido a los ciclos de aumento de temperatura alternos [3-5]. Se ha informado que el material de soldadura es particularmente vulnerable a las variaciones cíclicas de temperatura [6-8], ya que genera deformación por fluencia en tales condiciones. La tensión acumulada provoca la creación de grietas en el material de soldadura que posteriormente induce la rotura de los dedos de metal cerca de las uniones de los dedos de la barra colectora [9,10].

En este trabajo, se ha realizado un análisis detallado de la rotura de los dedos en módulos fotovoltaicos de silicio cristalino comerciales mediante el uso de condiciones de prueba de ciclos térmicos estándar. Imágenes de electroluminiscencia (EL) [11,12] y análisis de corriente-voltaje iluminado (IV) [13, 14] se han utilizado en conjunto para el análisis en profundidad de roturas de dedos. La combinación de estas técnicas de caracterización proporciona la ventaja de correlacionar la naturaleza de las roturas en correspondencia entre sí. La información obtenida de estas técnicas ha sido analizada para comprender el impacto, la evolución y la progresión de las roturas de los dedos con los ciclos térmicos, lo que puede ser fundamental en la mitigación de dichos defectos de manera temprana a nivel de producción. El estudio se ha canalizado para conocer en detalle la causa de las roturas de dedos y sus diferentes clasificaciones. Se ha diseñado una nueva constante de rotura de dedos para una evaluación comparativa de la durabilidad de los dedos en módulos fotovoltaicos.

## 2. Metodología

Se ha desarrollado un enfoque sistemático para llevar a cabo el análisis de rotura de dedos en módulos fotovoltaicos de silicio cristalino. Los módulos fotovoltaicos comerciales de diferentes fabricantes se han sometido a la norma TC, según la norma IEC 61215. Estos módulos se han caracterizado inicialmente por la técnica IV para obtener la potencia de salida y otros parámetros eléctricos de referencia. También se han realizado imágenes EL para el mapeo espacial de los defectos presentes en los módulos. La TC se ha realizado en múltiples etapas para observar la aparición y progresión de las roturas de los dedos en los módulos fotovoltaicos. En cada una de las etapas intermedias se han realizado análisis IV e imágenes EL para caracterizar los defectos generados tras las pruebas. Para respaldar los hallazgos experimentales, se han realizado pruebas adicionales en muestras de células solares encapsuladas para investigar los patrones de rotura de los dedos en las imágenes EL. Los tipos de rotura de dedos observados se han categorizado de acuerdo con su apariencia en las imágenes EL y se ha propuesto un enfoque generalizado para su cuantificación a partir de las imágenes EL. Para estimar el impacto relativo de estas roturas de dedos, se ha simulado un modelo de diodo distribuido de célula solar utilizando el simulador de circuito PSpice. Para comprender la progresión de las roturas de los dedos con los ciclos térmicos, se han realizado ciclos adicionales en los módulos para establecer una relación generalizada entre las roturas de los dedos con el número de ciclos. Los tipos de rotura de dedos observados se han categorizado de acuerdo con su apariencia en las imágenes EL y se ha propuesto un enfoque generalizado para su cuantificación a partir de las imágenes EL. Para estimar el impacto relativo de estas roturas de dedos, se ha simulado un modelo de diodo distribuido de célula solar utilizando el simulador de circuito PSpice. Para comprender la progresión de las roturas de los dedos con los ciclos térmicos, se han realizado ciclos adicionales en los módulos para establecer una relación generalizada entre las roturas de los dedos con el número de ciclos.

## 3. Experimental

Para investigar las roturas de los dedos en los módulos fotovoltaicos, se ha realizado un TC estándar en un total de 8 módulos de 4 fabricantes de PV de silicio cristalino comerciales (dos módulos cada uno). Los módulos han sido nombrados como M<sub>Minnesota</sub>, donde m representa el número de fabricante (1 a 4) y n representa los números de muestra 1 y 2 de cada fabricante. Los módulos han sido elegidos para tener parámetros eléctricos y geométricos comparables. Todos los módulos constan de 36 celdas conectadas en serie, que tienen una potencia de salida en el rango de 30 W a 40 W y un área en el rango de 0,25 a 0,35 m<sup>2</sup>.

Los módulos han sido sometidos a 200 ciclos térmicos según la norma IEC 61215. Para investigar la fina progresión de las roturas de los dedos con el tiempo, la prueba se ha realizado en cuatro etapas consecutivas de 50 ciclos cada una. Cada ciclo es de 5 h teniendo

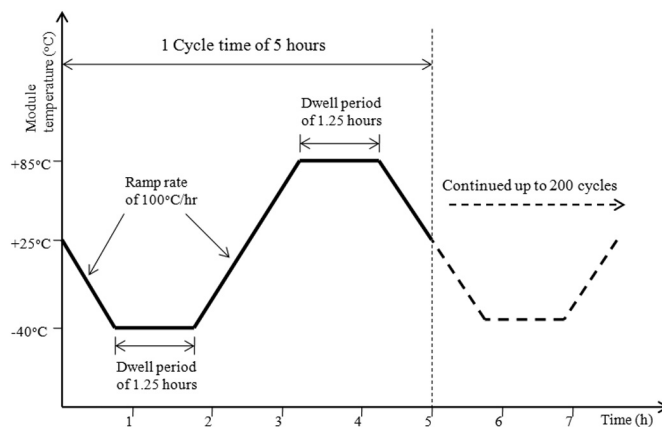


Figura 1. Perfil temporal de los ciclos térmicos.

temperaturas máxima y mínima de  $+85^{\circ}\text{C}$  y  $-40^{\circ}\text{C}$  respectivamente, con una velocidad de rampa de  $100^{\circ}\text{C} / \text{hy}$  un período de permanencia (temperatura constante) de 1,25 ha cada una a  $+85^{\circ}\text{C}$  y  $-40^{\circ}\text{C}$ . El perfil de tiempo de cada ciclo térmico se muestra en *Figura 1*. Para realizar la prueba se ha utilizado una cámara ambiental estándar (Weiss, WKS 3–1500 / 70/5) diseñada para pruebas de módulos fotovoltaicos.

Para investigar el cambio en la potencia máxima de salida ( $P_{AG_{\max}}$ ) de los módulos bajo prueba junto con el cambio en otros parámetros eléctricos a saber. corriente de cortocircuito ( $I_{\text{Carolina del Sur}}$ ), Abra el circuito de voltaje ( $V_{\text{jefe}}$ ), resistencia en serie ( $R_s$ ) y el factor de llenado (FF), El análisis IV se ha realizado utilizando un simulador solar. Las mediciones se han realizado en condiciones de prueba estándar (STC) de AM 1,5G,  $1000\text{ W} / \text{m}^2$  y  $25^{\circ}\text{C}$ . los  $R_s$  se ha medido a partir de la curva IV de los módulos fotovoltaicos. Software integrado de simulador solar calcula el  $R_s$  desde la pendiente de la curva IV cerca  $V_{\text{jefe}}$ . La repetibilidad del simulador fue buena, que fue inferior al 1% para todas las mediciones. Las mediciones se han realizado en condiciones espaciales y ambientales similares para minimizar el error debido a factores geométricos y ambientales.

Para la investigación y el análisis espacial de roturas de dedos en módulos fotovoltaicos, se han realizado imágenes EL. En la configuración experimental, se ha utilizado una cámara EL que tiene un detector de dispositivo de pareja cargada basado en silicio (Si-CCD) con una resolución de  $1024 \times 1024$  píxeles, que es suficiente para el análisis espacial de las roturas de los dedos en este estudio. La cámara se ha enfriado activamente mediante la circulación de aire forzado para aumentar la relación señal / ruido en la medición. La cámara se ha conectado a una fuente de alimentación programada externamente (TDK-Lambda, GEN150–10) que se utiliza para polarizar los módulos. Se ha utilizado un PC de monitorización para controlar el funcionamiento de EL. Todo el sistema se ha sincronizado de forma óptima para obtener una imagen de buena calidad. La configuración general se ha colocado dentro de una cámara oscura para minimizar la luz parásita y la cámara se ha mantenido a una temperatura constante de  $25^{\circ}\text{C}$  para mantener condiciones similares para todas las mediciones. Para un análisis comparativo de imágenes EL, los módulos se han operado bajo corriente constante modo en nominal  $I_{\text{Carolina del Sur}}$  valor de los respectivos módulos.

Las roturas de dedos identificadas en las imágenes EL también han sido investigadas con un microscopio digital (resolución de  $1600 \times 1200$  píxeles) que permite una inspección visual detallada en una vista ampliada del orden de hasta  $500 \times$  de la muestra de células.

#### 4. Resultados y discusión

En esta sección, la investigación sobre la evolución y progresión de las roturas de dedos bajo la prueba TC se ha presentado y analizado en detalle mediante resultados experimentales obtenidos mediante inspección visual, medición IV y técnica de imagen EL.

##### 4.1. Investigación inicial de defectos en módulos fotovoltaicos

La investigación inicial para la detección de defectos preexistentes en los módulos fotovoltaicos antes de que se haya realizado la prueba TC utilizando imágenes EL. Esta investigación inicial identificó dos tipos de defectos dominantes. El primer tipo de defecto estaba en la rejilla del dedo y el segundo tipo eran microgrietas en la oblea de silicio. Los defectos observados en las rejillas de los dedos se clasificaron además en dos tipos según la ubicación y el patrón visible en las imágenes EL. El primer tipo fueron cortes de dedos, que aparecieron como regiones oscuras de forma rectangular que se originaron en lugares de corte a lo largo del dedo afectado en las imágenes EL, como se muestra en *Figura 2(a)*. Estas ubicaciones de los cortes de los dedos se observaron visualmente como una interrupción en las líneas de los dedos y se encontraron comúnmente dentro de los módulos investigados. El segundo tipo de defectos de los dedos se identificaron como roturas de los dedos en los módulos, que eran visibles como regiones oscuras de forma rectangular que se originaban cerca de las uniones de los dedos de la barra colectora (punto común de conexión de la barra colectora y el dedo) debajo de la cinta de cobre, como se muestra en la

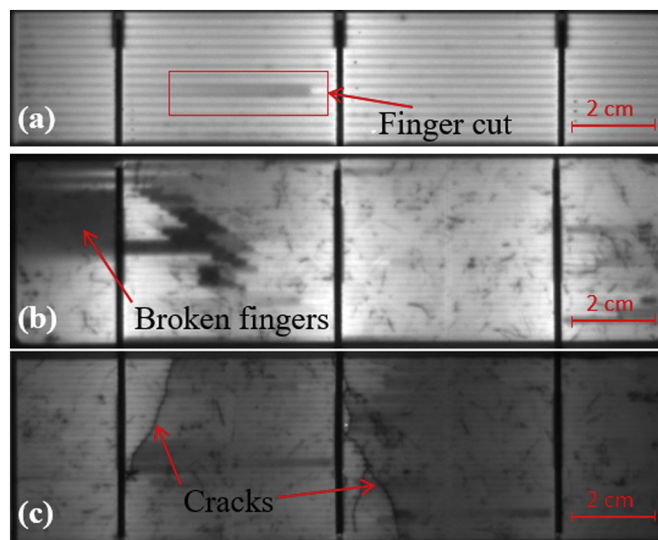


Figura 2. Tipos de defectos observados en las imágenes EL de módulos fotovoltaicos antes de la prueba de ciclos térmicos: (a) corte de dedo; (b) roturas de dedos y (c) grietas en la oblea que se originan en la barra colectora.

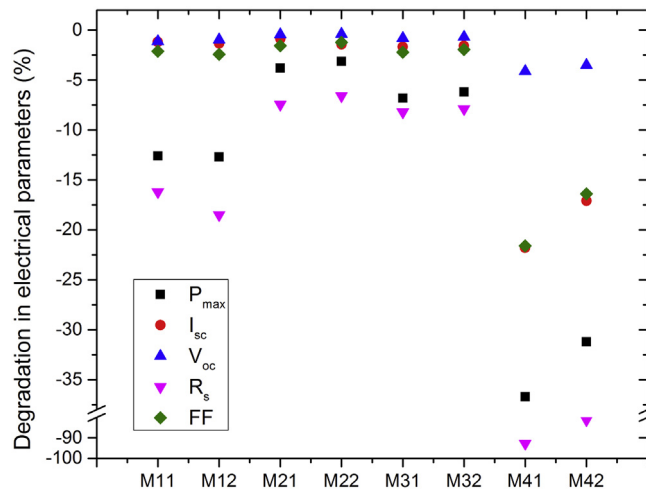


Fig. 3. Degradación de los parámetros eléctricos de los módulos después de 200 ciclos térmicos.

Imagen EL en Figura 2(B). Las roturas de los dedos eran difíciles de localizar visualmente sin un microscopio, a diferencia de los cortes de los dedos. Sin embargo, eran fácilmente diferenciables en imágenes EL según la ubicación de origen del patrón rectangular oscuro. Ambos tipos de defectos en los dedos (Figura 2) se observó que aparecían en una distribución espacial aleatoria a través de las celdas de los módulos investigados.

Además de los defectos de los dedos, algunos de los módulos investigados también mostraron grietas en las obleas de silicio, visibles como un patrón en forma de línea irregular oscura en las imágenes EL, como se muestra en Figura 2(C). Estas grietas pueden haber aparecido debido a un desequilibrio mecánico en la estructura del módulo o la tensión generada en las uniones de soldadura durante el proceso de fabricación [15-20]. La mayoría de las grietas observadas en los módulos investigados se originaron en la barra colectora, lo que indica que es muy probable que estas grietas sean inducidas por soldadura.

#### 4.2. Investigación después de la prueba de ciclos térmicos

El deterioro de los parámetros eléctricos del módulo después de 200 ciclos térmicos se presenta en Fig. 3. Varias caídas de potencia en el se observan los módulos; donde la menor caída (menos del 4%) se observa en las muestras del módulo M2 y la caída más alta (más del 30%) en las muestras M4. Los módulos de muestra de cada lote han mostrado una caída de energía similar. La caída de energía en los módulos se puede atribuir a deterioro de otros parámetros eléctricos.  $R_s$  se identifica como el parámetro más afectado, mientras que  $V_{jefe}$  es el menos afectado, como se observa en Fig. 3. El cambio significativo en  $R_s$  indica que las rutas de transporte de corriente en los módulos se han visto significativamente afectadas con una reducción insignificante en  $V_{jefe}$  indica que las resistencias de derivación en los módulos no se han visto muy afectadas. Por lo tanto, del análisis IV, aumento en  $R_s$  se identifica como el modo de degradación global en condiciones de prueba TC.

Las imágenes EL de un módulo de muestra de cada lote de módulos antes y después de 200 ciclos se muestran en Figura 4. Las imágenes indican predominantemente la aparición de regiones oscuras de forma rectangular que se originaron en las uniones de los dedos de la barra colectora, identificadas como roturas de los dedos de la rejilla frontal. Las roturas de los dedos aparecieron de forma variable en las diferentes muestras de módulos, donde el número máximo de roturas aparecieron en los módulos M4. Además de las nuevas roturas, las roturas de dedos preexistentes en los módulos también se deterioraron bajo las condiciones de prueba, visibles como un área aumentada y una intensidad EL reducida de los patrones rectangulares oscuros existentes. La aparición y el deterioro de roturas de dedos en los módulos apoyaron el gran grado de incremento en  $R_s$  y también decremento en FF y potencia del módulo en los resultados del análisis IV.

Además de las roturas de los dedos, se observa que las grietas preexistentes se deterioran durante la prueba, como se observa en los módulos M2 y M3 (Figura 4). Este deterioro se distingue por la caída en la intensidad de EL en el área agrietada y también en las áreas de celdas completamente separadas. Se observa que el deterioro es específico de la ubicación, donde solo se ven afectadas las grietas preexistentes ubicadas cerca de las uniones de los dedos de la barra colectora, pero no aparecieron nuevas grietas. La aparición de roturas en los dedos y el deterioro de las grietas identificó que las uniones de los dedos de las barras colectoras eran las más vulnerables a la fatiga térmica bajo la prueba. Aparte de estos dos tipos de defectos, existen otras posibilidades de degradación bajo la prueba, como la generación de microgrietas en diferentes capas del módulo, la degradación de la calidad del material o cualquier daño estructural que puede no ser visible en las imágenes EL pero que también puede contribuir a pérdida de potencia. Sin embargo, el presente estudio se ha centrado únicamente en el análisis de roturas de dedos.

##### 4.2.1. Efecto de la configuración de la soldadura en las roturas de los dedos

La rotura de los dedos por fatiga térmica se produce debido a la diferencia en el coeficiente de temperatura entre la celda de silicio y la cinta de cobre recubierta de soldadura [10]. En este contexto, se ha investigado la configuración de la soldadura en las muestras del módulo y su efecto correspondiente sobre las roturas de los dedos. Se encapsuló una celda comercial multicristalina soldando las cintas parcialmente en la parte superior de las barras colectoras. Esta configuración crea esencialmente una región soldada y sin soldaduras en la celda. Esta celda encapsulada ha sido expuesta a la prueba de 100 TC. Las imágenes EL (Figura 5) después de la prueba muestran que las roturas aparecieron solo en la región soldada, mientras que las regiones libres de soldadura no generaron ninguna rotura. Indica que la configuración de la soldadura es un parámetro crucial para

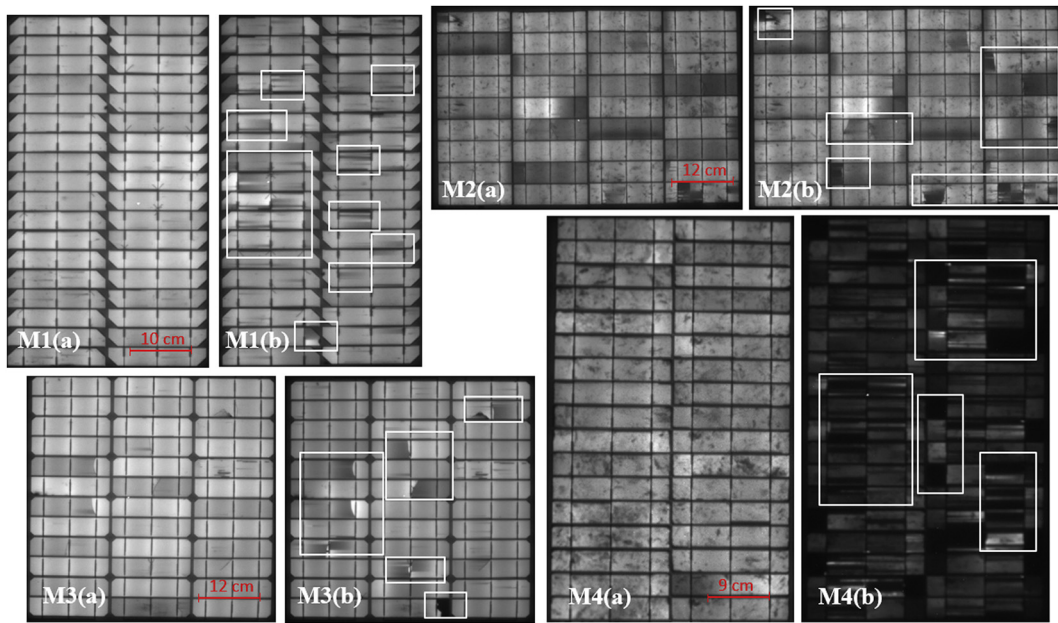


Figura 4. Imágenes EL de diferentes módulos de muestra (a) antes y (b) después de 200 ciclos térmicos.

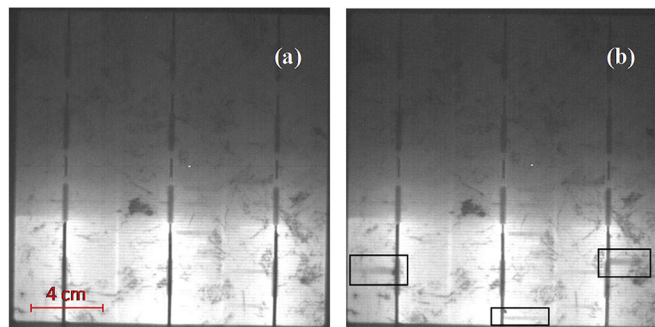


Figura 5. Imágenes EL de celda encapsulada con cinta parcialmente soldada (a) antes y (b) después de 100 ciclos térmicos, lo que indica la aparición de roturas en los dedos.

creación de roturas de dedos bajo prueba TC.

Las configuraciones de soldadura en las muestras de módulos también se han investigado visualmente. Diferentes calidades de soldadura en las celdas de una muestra de módulo se muestran en *Figura 6*, como una buena cinta soldada (*Figura 6a*), una cinta soldada defectuosa donde el exceso de material de soldadura se esparce cerca de la cinta en la parte superior de los dedos (*Figura 6b*), goteo de material de soldadura sobrante en la parte superior de los dedos (*Figura 6c*) y una cinta dislocada (*Figura 6D*). Todos los módulos investigados mostraron este tipo de configuraciones de soldadura defectuosas en diferentes grados. Se ha observado que en estas ubicaciones se han generado más roturas de dedos después de la prueba TC en todas las muestras del módulo, lo que indica que estos tipos de configuraciones de soldadura deficientes generan roturas de dedos cerca de las uniones de los dedos de la barra colectora. Esto también se puede utilizar para explicar las roturas de dedos preexistentes observadas en las muestras del módulo (*Figura 2*) inicialmente antes de la prueba TC, que posiblemente haya aparecido durante el proceso de tabulación de la cinta donde el exceso de material de soldadura podría haber causado roturas durante su enfriamiento a temperatura ambiente.

También se ha observado que la cinta dislocada provocó la máxima cantidad de roturas de dedos entre otras configuraciones de soldadura defectuosas. Para investigar más a fondo el grado de gravedad de las roturas de los dedos debido a la dislocación de la cinta en la prueba TC, se ha diseñado un experimento. Una celda encapsulada multicristalina con cintas ligeramente desviadas (en la parte superior de las barras colectoras) se sometió a una prueba de 100 TC. La imagen EL después de la prueba (*Figura 7*) muestra que una cantidad significativa de roturas de dedos aparecieron solo en el lado de las barras colectoras donde la cinta toca las respectivas uniones de los dedos de la barra colectora. La influencia significativa de las cintas dislocadas en las roturas de los dedos explica la aparición de patrones rectangulares oscuros anchos en las imágenes EL de los módulos de muestra (*Figura 4, M4b*). Se puede inferir que la tabulación de la cinta es un proceso crucial en la fabricación fotovoltaica y se debe tener especial cuidado al soldar las cintas en la parte superior de las barras colectoras para minimizar las roturas de los dedos.

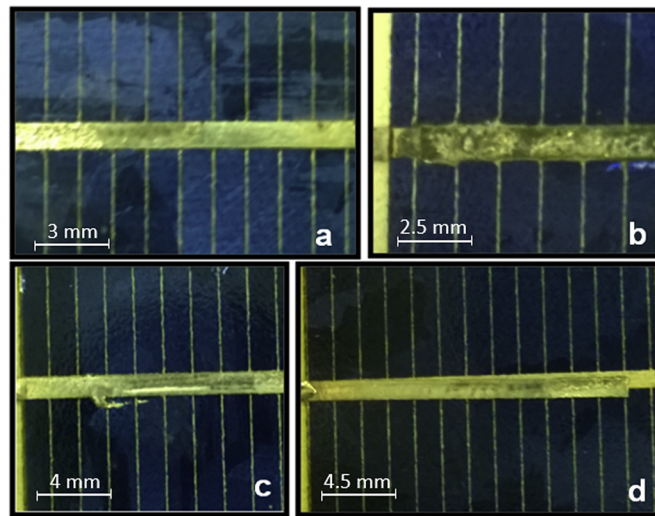


Figura 6. Tipos de configuraciones de soldadura observadas visualmente en las celdas: (a) buena cinta soldada; (b) exceso de material de soldadura en las proximidades de la cinta; (c) exceso de material de soldadura goteó sobre el dedo y (d) cinta dislocada en la parte superior de la barra colectora.

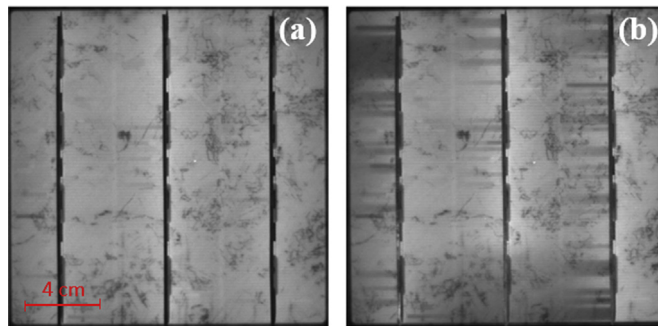


Figura 7. Imágenes EL de celda encapsulada con cintas de interconexión dislocadas (a) antes y (b) después de 100 ciclos térmicos.

#### 4.3. Análisis de roturas de dedos

En esta sección, se ha investigado la clasificación y cuantificación de los patrones de rotura de dedos observados en las imágenes EL y el impacto correspondiente de los patrones de rotura clasificados en el rendimiento de la celda. A los efectos de la representación, se ha desarrollado una metodología para la cuantificación de los dedos, que se ha utilizado en las secciones siguientes. Dado que la rotura del dedo se produce debido a la formación de grietas cerca de las uniones de la barra colectora y el dedo, el número de tales uniones es el potencial contable.

El recuento en una celda se puede representar como  $2N_{\text{cama y desayuno}} \times \text{norte}^{\text{Aleta}} \times \text{norte}^{\text{Celda}}$  donde  $\text{norte}^{\text{cama y desayuno}}$  y  $\text{norte}^{\text{Aleta}}$  son el número de barras colectoras y dedos en la celda respectivamente. Asimismo, en el módulo, el recuento es  $2N_{\text{cama y desayuno}} \times \text{norte}^{\text{Aleta}} \times \text{norte}^{\text{Celda}}$  donde  $\text{norte}^{\text{Celda}}$  es el número de celdas del módulo. Se eligieron módulos de muestra M4 para el análisis mencionado anteriormente, ya que mostraba todas las variedades de patrones de rotura de dedos.

##### 4.3.1. Clasificación y cuantificación de patrones de rotura de dedos

Los patrones de rotura de dedos se han clasificado en tres tipos distintos, sobre la base de la ubicación de la unión afectada y los patrones visibles en las imágenes EL, como se muestra en la imagen EL ampliada de una parte de un módulo (Figura 8). Los primeros tipos (Tipo A) son los dedos parcialmente afectados que se observan entre dos barras colectoras. En este caso, la rotura se produce en la unión del dedo de la barra colectora en cualquier extremo del dedo. Una gran cantidad de corriente fluye a través del dedo desde el otro extremo intacto, por lo que aparece parcialmente oscuro con una intensidad EL disminuida a lo largo de la longitud del dedo. Estos son los tipos de rotura más comunes que se encuentran en las etapas intermedias de la prueba TC. Los segundos tipos (Tipo B) son los dedos totalmente afectados, también observados entre dos barras colectoras. Aquí, las uniones de los dedos de la barra colectora en ambos extremos del dedo se rompen. Por lo tanto, la falta de corriente en ambas direcciones produce una reducción de la intensidad de EL en toda la longitud del dedo. Los terceros tipos (Tipo C) son las uniones rotas de los dedos de la barra colectora en el lado exterior de las barras colectoras donde los dedos están conectados a los bordes de la celda. En este caso, la única ruta de conducción disponible desde las barras colectoras se ve afectada, por lo que aparece oscura en toda la longitud del dedo en las imágenes EL.

Se habían observado diferentes anchos de grieta en las uniones de la barra colectora bajo la condición de prueba TC, como se muestra en la imagen microscópica de una celda de muestra soldada explotada bajo la prueba TC (Figura 9). También ha observado a partir de las imágenes EL en Figura 8 que varía la caída en la intensidad de EL en los dedos afectados para los tipos de rotura individuales. Como ejemplo, una diferencia significativa en la caída de EL



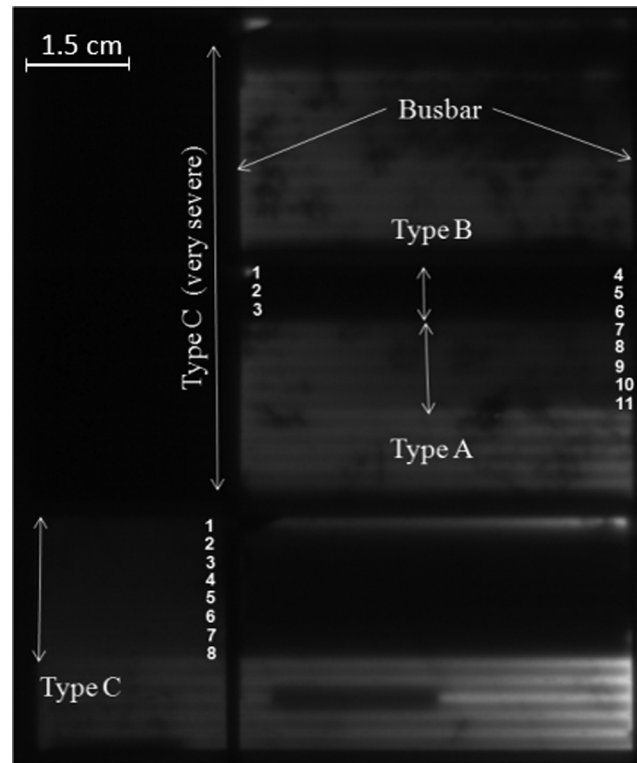


Figura 8. Imagen EL ampliada de células que muestran roturas de dedos de tipo A, B y C y su metodología de recuento.

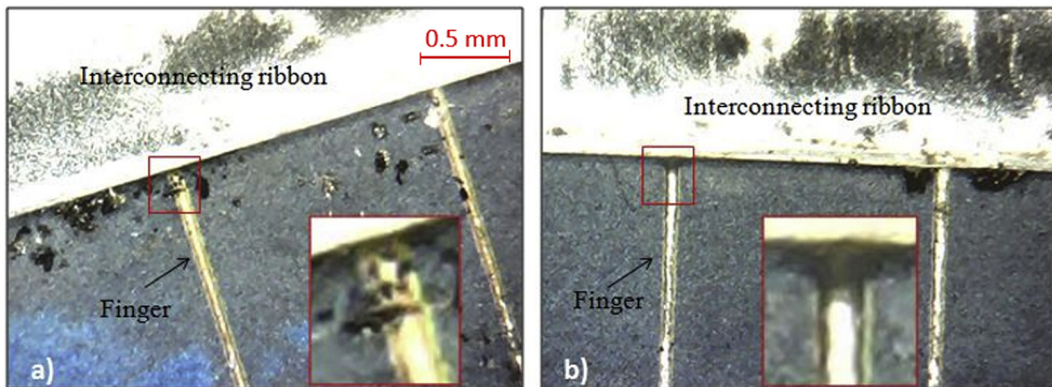


Figura 9. Imágenes microscópicas de un (a) dedo parcialmente desprendido y un (b) dedo completamente desprendido en una celda.

Las intensidades de roturas de tipo C en dos ubicaciones diferentes se pueden ver en [Figura 8](#). Las intensidades variables de EL pueden deberse al ancho variable de las grietas generadas en las uniones de los dedos de la barra colectora después de la prueba que proporciona una ruta resistiva diferente para el flujo de corriente a los dedos durante la operación EL.

La cuantificación de los tipos de rotura de dedos se ha mostrado en [Figura 8](#), donde se han asignado los dedos rotos individuales números. El recuento de dedos rotos para diferentes tipos de roturas se ha identificado a partir del ancho del patrón rectangular oscuro. De esta manera, el tipo B se considera como dos roturas y el tipo A y el tipo C como una rotura cada uno. Este procedimiento de recuento se ha utilizado en las siguientes secciones para calcular el número de patrones de rotura de dedos en los módulos.

#### 4.3.2. Análisis de impacto de patrones de rotura de dedos.

Para estudiar el impacto de diferentes patrones de rotura de dedos (Tipo A, B y C), se ha simulado un modelo de diodo distribuido de celda solar utilizando el simulador de circuito PSpice. Este enfoque de simulación se ha utilizado en la literatura para estudiar el efecto de diferentes parámetros eléctricos en el rendimiento de las células solares [21–24]. En este enfoque, la célula solar se ha dividido en un gran número de áreas elementales ( $150 \times 30$ ) y cada área elemental se ha modelado utilizando su circuito eléctrico equivalente, que consta de un diodo, una fuente de corriente y una resistencia en paralelo. El número de áreas elementales se ha elegido considerando el dedo y la barra colectora.

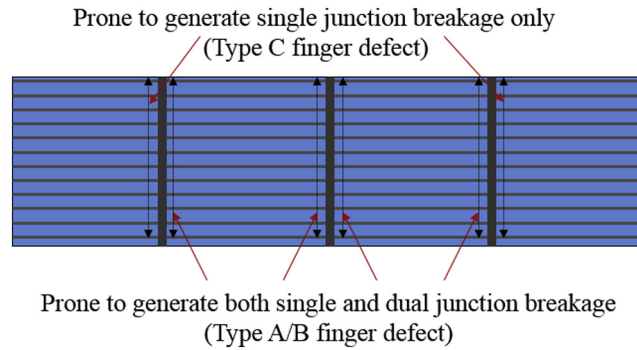


Figura 10. Ubicación de diferentes tipos de roturas de dedos (Tipo A, B y C) introducidas en simulación en una sola celda solar de tres barras colectoras.

ancho y el tiempo de cálculo óptimo. Los parámetros eléctricos de cada área elemental se han obtenido a partir de una celda solar de silicio cristalino real. Los dedos y las barras colectoras se han modelado de acuerdo con sus respectivas resistencias medidas y la resistencia lateral del emisor se ha estimado a partir de la resistencia de la hoja medida. Los otros parámetros; la saturación inversa actual ( $y_{00}$ ) y el factor de idealidad del diodo ( $n$ ) se han obtenido a partir de las características de IV oscuro de la celda real.

Las roturas de los dedos en la intersección de las barras colectoras y los dedos se han introducido en el modelo por una alta resistencia en el ubicaciones correspondientes. La ubicación respectiva de introducción de los tres tipos de roturas se muestra en [Figura 10](#). Se ha considerado un valor de resistencia constante en la simulación para relacionar la tendencia de pérdida de potencia de salida con roturas de dedos. La pérdida de potencia de salida con un número creciente de roturas de dedos, para los tres tipos de roturas, se muestra en [Figura 11](#). La simulación se ha realizado en pasos del 5% para roturas de hasta el 30%, que es un número significativamente grande en el aspecto práctico. La figura muestra que el porcentaje de pérdida en la potencia de salida aumenta de manera no lineal al aumentar el número de roturas para estos tipos de roturas individuales. El tipo A muestra la menor pérdida, mientras que el tipo C muestra la más alta. Se puede explicar como en el caso del Tipo A, la rotura ocurre cerca de una unión de barra colectoras-dedo entre dos barras colectoras. Para este tipo, la corriente aún fluye a través del otro extremo intacto, a diferencia de la rotura del Tipo B, y da como resultado una caída de potencia menor. Si ambos extremos se rompen (Tipo B), todo el dedo se vuelve casi inactivo y se produce una mayor pérdida de potencia en comparación con el Tipo A. En el caso del Tipo C,

#### 4.3.3. Progresión de roturas de dedos con ciclos térmicos.

En esta sección se ha investigado la tendencia progresiva de rotura de dedos con ciclos térmicos. Se ha elegido el lote de módulos con un número suficientemente alto de roturas (módulos de muestra M4) para la investigación. Las imágenes EL de un módulo de muestra en todas las etapas intermedias de TC se han presentado en [Figura 12](#). La figura muestra que todos los patrones de rotura de dedos aparecieron en el módulo en una distribución espacial aleatoria. Para una representación simplificada, se ha cuantificado la distribución de roturas de dedos en celdas individuales del módulo con etapas de prueba progresivas (siguiente [Sección 4.3.1](#)) y representado en [Figura 13](#). Los números de la figura representan el porcentaje de rotura del número total de dedos en una celda. Las escalas de grises diferencian porcentajes variables, donde las escalas más oscuras representan números más altos. La diferencia en la cantidad de roturas de dedos en las celdas individuales ([Figura 13](#)) puede atribuirse a la diferencia en la calidad de la soldadura. La representación también muestra un incremento drástico en el número de roturas en

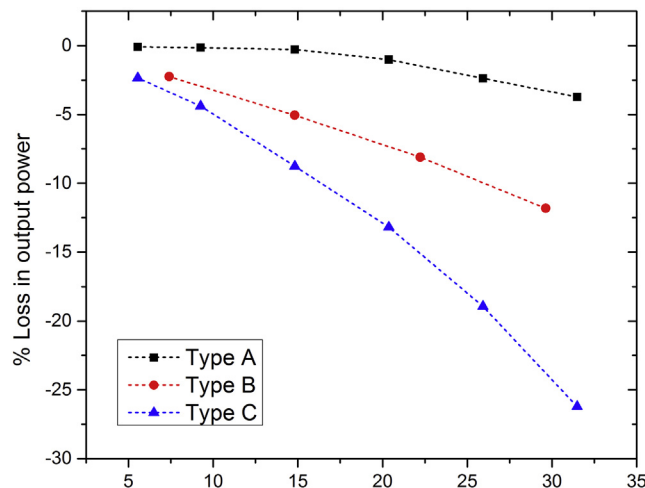


Figura 11. Tendencia de la pérdida de potencia de salida en una celda con roturas de dedos, para roturas de tipo A, B y C.



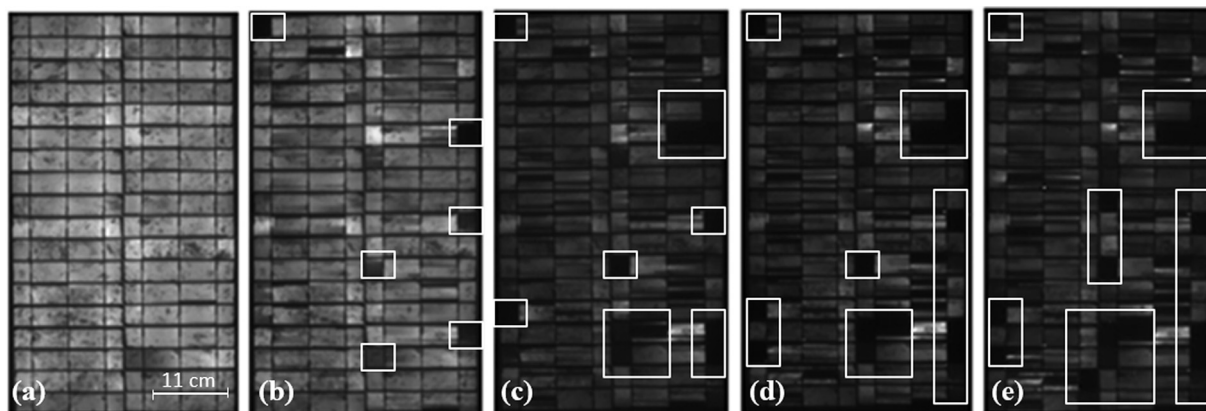


Figura 12. Imágenes EL del módulo de muestra sometido a prueba de ciclo térmico; (a) antes y después (b) 50 (c) 100 (d) 150 y (e) 200 ciclos térmicos, lo que indica deterioro de los patrones de rotura de los dedos.

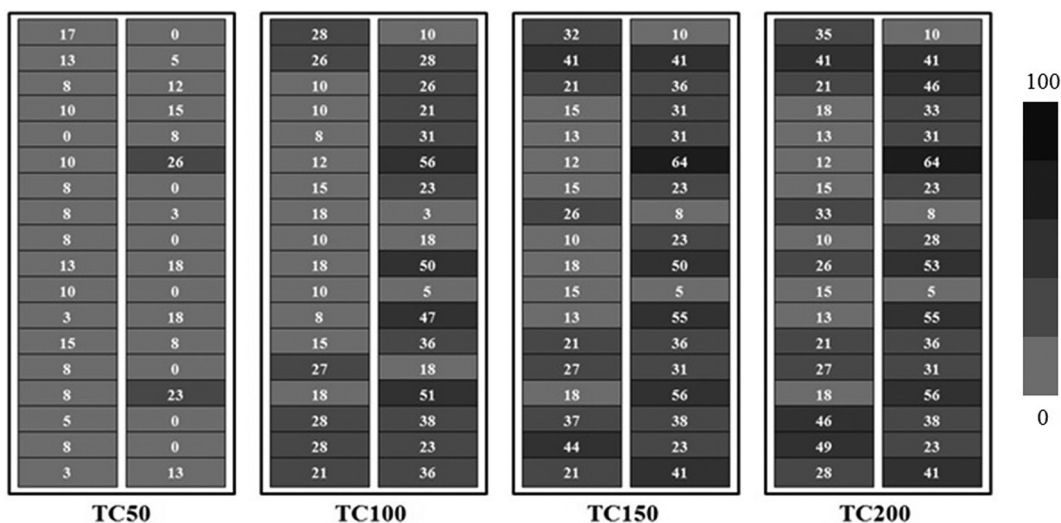


Figura 13. Distribución y progresión de roturas de dedos cuantificadas (en porcentaje) en diferentes etapas de prueba en las celdas del módulo.

diferentes celdas hasta 100 ciclos y un incremento comparativamente menor en etapas posteriores (de TC150 a TC200). Esto indica una tendencia de saturación global de roturas de dedos a nivel de módulo con ciclos térmicos progresivos.

Para investigar más a fondo la tendencia a la saturación de las roturas de los dedos, se han realizado 200 ciclos térmicos adicionales en estos módulos a intervalos regulares de 50 ciclos. El número de dedos intactos o no rotos ( $norte_f$ ) en las etapas intermedias de la prueba se han calculado identificando el número de dedos rotos ( $norte_{pensión\ completa}$ ) y siguiendo la ecuación,

$$norte_f = norte_0 - norte_{pensión\ completa} \quad (1)$$

Dónde  $norte_0$  es el número inicial de dedos no rotos antes de la prueba. Figura 14 representa la tendencia decreciente en el número total de dedos no rotos para dos módulos de muestra hasta 400 ciclos. La tendencia muestra una drástica disminución en el número de no rotos dedos en los ciclos iniciales y saturando la naturaleza en los ciclos superiores. La naturaleza observada de la relación entre el número de dedos no rotos ( $norte_f$ ) con ciclos térmicos ( $nortec$ ) se puede representar como,

$$norte_f = \alpha e^{-\beta nortec} \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  es el número inicial de dedos no rotos en el módulo, es decir  $norte_0$  y  $\beta$  es una constante relacionada con las características de soldadura y los parámetros de prueba que está directamente relacionada con la durabilidad de los dedos en el módulo. La Eq.(2) puede ser representado como,

$$norte_f = norte_0 m_1^{\frac{nortec}{m_2}} \quad (3)$$

Diferenciando Eq. (3),

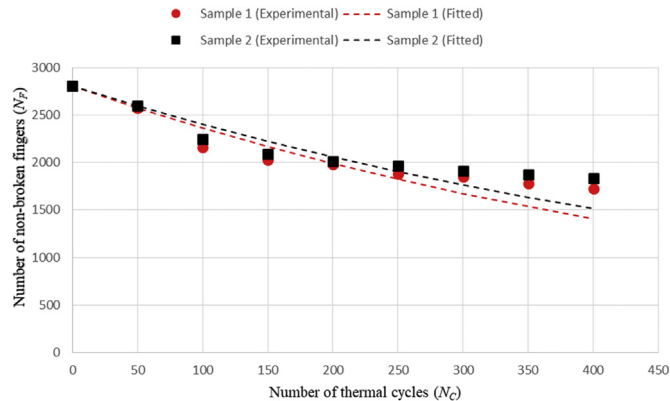


Figura 14. Tendencia entre el número de dedos no rotos con ciclos térmicos.

$$\frac{\Delta N_F}{\Delta N_C} = -\beta N_F \quad (4)$$

La Eq. 4 representa la tasa de degradación de las roturas de los dedos bajo la prueba TC. Depende linealmente del número de no rotos. dedos (nortec) en cualquier caso (nortec) del examen. El término constante  $\beta$  se define como la constante de rotura del dedo, que es un parámetro determinante de rendimiento clave en los módulos. Se puede utilizar para la evaluación comparativa de la durabilidad de los dedos entre diferentes módulos, en condiciones de prueba TC. Combinando Eq.(1) y (3),  $\beta$  se estima como,

$$\beta = \frac{1}{\text{nortec}} \ln \frac{\text{nortec}}{\text{nortec} - \text{nortec}_{\text{quedado}}} \quad (5)$$

El  $\beta$  indica la calidad de soldadura global en un módulo fotovoltaico. Cuanto menor es el  $\beta$ , mayor es la durabilidad de los dedos en un módulo fotovoltaico en particular. La tendencia de dedos no rotos con ciclos térmicos se ha ajustado considerando el número inicial de dedos no rotos y el valor medio de la  $\beta$  obtenida experimentalmente, como se muestra en Figura 14.

## 5. Conclusiones

En este artículo, se ha presentado un análisis detallado de las roturas de los dedos en módulos fotovoltaicos de silicio cristalino sometidos a una prueba estándar de ciclos térmicos. El análisis de imágenes de electroluminiscencia (EL) se ha aprovechado junto con el análisis de corriente-voltaje (IV) iluminado para investigar la causa, los tipos, la gravedad y la progresión de las roturas de los dedos. El incremento en la resistencia en serie se identificó como el modo de degradación global bajo la prueba de ciclo térmico. Se encontró que las roturas de los dedos eran el tipo de defecto dominante que aparecía espacialmente en diferentes grados en las imágenes EL de los módulos investigados. Se reconocieron múltiples configuraciones de soldadura defectuosas con impactos variables en la cantidad de roturas como las causas dominantes de roturas de dedos; como derrame de material de soldadura sobrante y cinta de interconexión desplazada. La configuración con la cinta dislocada en la parte superior de las barras colectoras produjo la cantidad más significativa de roturas, lo que fue respaldado por experimentos realizados en una muestra de células encapsuladas. Los distintos tipos de dedos rotos se clasificaron según su aparición en las imágenes EL originadas por la rotura de las uniones de los dedos de la barra colectora. El impacto de estos tipos de rotura en el rendimiento de la celda mostró que la unión rota de la barra colectora y el dedo que conecta la barra colectora al borde de la celda afecta de manera más significativa el rendimiento de la celda. Se observó que las roturas de los dedos se saturaban en módulos con ciclos térmicos progresivos. El comportamiento del ciclo extendido indicó una tendencia de una disminución exponencial de los dedos intactos debido a la rotura que logró una saturación global en ciclos más altos. De esta tendencia se dedujo una constante de rotura de dedos que puede ser fundamental para la evaluación comparativa de la durabilidad de los dedos y, por lo tanto, la calidad de la soldadura en módulos fotovoltaicos. Los hallazgos de este estudio pueden ser útiles para establecer pautas para la prevención de fallas por rotura de dedos en módulos fotovoltaicos durante el proceso de fabricación y la instalación al aire libre.

## Referencias

- [1] MA Quintana, DL King, TJ McMahon, CR Osterwald, Degradación comúnmente observada en módulos fotovoltaicos envejecidos en el campo, *Actas de la Conferencia de Especialistas en Fotovoltaica, Registro de la Conferencia de la Vigésimo Novena IEEE, Nueva Orleans, Luisiana, EE. UU., 2002*, págs. 1436–1439.
- [2] M. Chicca, G. Tamizhmani, Técnicas no destructivas para determinar modos de degradación: Experimentación con módulos fotovoltaicos de 18 años, *Actas de la 42a Conferencia de especialistas fotovoltaicos del IEEE, Nueva Orleans, LA, EE. UU., 2015*, págs. 1-5.
- [3] Norma IEC 61215, Módulos fotovoltaicos (PV) terrestres de silicio cristalino - Calificación de diseño y aprobación de tipo, Ginebra, Suiza, (2005).
- [4] C. Ferrara, D. Philipp, ¿Por qué fallan los módulos fotovoltaicos? *Energy Procedia* 15 (2012) 379–387.
- [5] R. Khatri, S. Agarwal, I. Saha, SK Singh, B. Kumar, Estudio sobre la fiabilidad a largo plazo de los módulos fotovoltaicos y análisis de la degradación de la energía mediante pruebas de envejecimiento acelerado y técnica de electroluminiscencia, *Energy Procedia* 8 (2011) 396–401.
- [6] N. Bosco, TJ Silverman, S. Kurtz, Fatiga termomecánica específica climática de juntas soldadas de módulos fotovoltaicos de placa plana, *Microelectron. Reliab.* 62 (2016) 124–129.
- [7] N. Bosco, TJ Silverman, S. Kurtz, La influencia de los materiales y el diseño de los módulos fotovoltaicos en la durabilidad de la fatiga térmica de las juntas de soldadura, *IEEE J. Photovolt.* 6 (6) (2016) 1407–1412.

- [8] S. Kumar, R. Gupta, Investigación y análisis de la degradación termomecánica de los dedos en un módulo fotovoltaico en condiciones de estrés cíclico térmico, *Sol. Energía* 174 (2018) 1044–1052.
- [9] N. Park, J. Jeong, C. Han, Estimación de la tasa de degradación del módulo fotovoltaico de silicio multicristalino bajo estrés por ciclos térmicos, *Microelectron. Reliab.* 54 (8) (2014) 1562–1566.
- [10] P. Chaturvedi, B. Hoex, TM Walsh, Dedos de metal rotos en células solares y módulos fotovoltaicos de obleas de silicio, *Sol. Energy Mater. Sol. Celdas* 108 (2013) 78–81.
- [11] T. Fuyuki, A. Kitiyanan, Diagnóstico fotográfico de células solares de silicio cristalino que utilizan electroluminiscencia, *Appl. Phys. Mater. Sci. Proceso.* 96 (1) (2009) 189–196.
- [12] A. Sinha, OS Sastry, R. Gupta, Caracterización no destructiva de los efectos de decoloración de encapsulantes en módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, *Sol. Energy Mater. Sol. Celdas* 155 (2016) 234–242.
- [13] KM Lin, YH Lee, WY Huang, YW Kuo, LK Wang, SY Yang, Análisis de degradación de potencia y confiabilidad a largo plazo de módulos solares de silicio multicristalino utilizando la técnica de electroluminiscencia, *Adv. Mater. Res.* 562 (2012) 90–93.
- [14] JM Delgado-Sanchez, E. Sanchez-Cortezon, C. Lopez-Lopez, R. Aninat, MD Alba, Modo de falla y análisis de efecto de un módulo fotovoltaico CIGS de película delgada a gran escala, *Ing. Fallar. Anal.* 76 (2017) 55–60.
- [15] MA Muñoz, MC Alonso-García, N. Vela, F. Chenlo, Degradación temprana de módulos fotovoltaicos de silicio y condiciones de garantía, *Sol. Energía* 85 (9) (2011) 2264–2274.
- [dieciséis] M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser, B. Bjørneklett, El riesgo de pérdida de potencia en módulos fotovoltaicos basados en silicio cristalino debido a microgrietas, *Sol. Energy Mater. Sol. Celdas* 95 (2011) 1131–1137.
- [17] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Eitner, M. Köntges, Distribución espacial y orientacional de fisuras en módulos fotovoltaicos cristalinos generados por ensayos de carga mecánica, *Sol. Energy Mater. Sol. Celdas* 95 (2011) 3054–3059.
- [18] S. Pingel, Y. Zemen, O. Frank, T. Geipel, J. Berghold, Estabilidad mecánica de las células solares dentro de los paneles solares, *Actas de la 24a Conferencia Europea de Energía Solar Fotovoltaica*, WIP, Dresden, Alemania, 2009, págs. 3459–3464.
- [19] B. Kang, N. Park, SJ Tark, WW Oh, S. Park, Y. Do Kim, HS Lee, D. Kim, Límite de elasticidad avanzado de la cinta de interconexión para módulo fotovoltaico con control de textura cristalográfica, *Met. Mater. En t.* 20 (2014) 229–232.
- [20] A. Kilikeyicius, A. Cantes deska, K. Kilikeyicienmi, Análisis de la influencia de cargas dinámicas externas en el rendimiento estructural de los módulos fotovoltaicos, *Ing. Fallar. Anal.* 66 (2016) 445–454.
- [21] P. Somasundaran, R. Gupta, Influencia de la derivación local en el rendimiento eléctrico en células solares de silicio industriales, *Sol. Energía* 139 (2016) 581–590.
- [22] S. Roy, P. Somasundaran, R. Gupta, Estimación de la resistencia en derivación mediante imágenes de electroluminiscencia, *Actas de la 29ª Conferencia y exposición europea de energía solar fotovoltaica*, Ámsterdam, Países Bajos, 2014, págs. 1224–1227.
- [23] A. Zekry, AY Al-Mazroo, Un modelo SPICE distribuido de una célula solar, *IEEE Trans. Electron Dev.* 43 (5) (1996) 691–700.
- [24] B. Galiana, C. Algorta, I. Rey-Stolle, IG Vara, Un modelo 3-D para células solares concentradoras basado en unidades de circuito distribuido, *IEEE Trans. Electron Dev.* 52 (12) (2005) 2552–2558.