

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTROTÉCNIA



**CARACTERIZACION DE CELDAS SOLARES Y PANELES  
SOLARES MEDIANTE IMAGENES DE  
ELECTROLUMINISCENCIA**

Plan de Trabajo para el Proyecto Integrador Profesional presentado por:

ALEXIA SUCA DE AZEVEDO

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para acceder al  
título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

Dirección

Director: Dr. Kurt Taretto

Codirector: Dr. Matías Córdoba

Neuquén, 26 de junio de 2023

## Resumen

Una celda solar en polarización directa emite fotones, en un fenómeno conocido como electroluminiscencia. La inyección de corriente a través de sus contactos, provoca la recombinación en el material semiconductor, la cual al menos en parte corresponde a recombinación radiante. Este proceso es utilizado comúnmente para la caracterización de celdas solares, ya que permite medir la eficiencia de conversión de energía de la celda y obtener información sobre su rendimiento.

Este trabajo trata la implementación de este ensayo como método de caracterización de celdas de silicio cristalino. Se implementa un sistema de medición con una cámara CCD, una fuente de alimentación operada por computadora, y un portamuestra donde se coloca la muestra a caracterizar. Se realizan mediciones a distintos niveles de polarización y se obtienen imágenes termográficas con un sensor infrarrojo, para obtener información adicional de las muestras y el material semiconductor que las compone.

El ensayo permitió estudiar tres celdas de silicio monocristalino y un módulo de silicio policristalino, proporcionando información visual y medidas precisas relacionadas a su eficiencia de conversión. Esto se logra mediante la integración de los resultados de distintos estudios, empezando por una identificación preliminar de defectos y heterogeneidades en el material semiconductor. Posteriormente se evalúa la intensidad de la emisión global y local a distintos niveles de polarización, y la resistencia serie y la densidad de corriente de saturación inversa locales. Se determina la distribución de los potenciales eléctricos en cada una de las celdas del módulo para estudiar la variación local de la resistencia serie.

La calidad de las imágenes demostró las posibilidades de este ensayo en términos de flexibilidad del equipo utilizado y adaptación a un amplio rango de muestras. De esta forma, se comprobó la relevancia del ensayo en aplicaciones de control de calidad, monitoreo de celdas y ensayo no destructivo de celdas y módulos solares.

**Palabras clave: celdas solares, electroluminiscencia, caracterización de celdas.**

## **Abstract**

A forward biased solar cell emits photons, in a phenomenon known as electroluminescence. The current injection through its contacts causes recombination in the semiconductor material, at least a percentage due to radiative recombination. This is the basis of a method already in use for characterizing solar cells.

This work deals with the implementation of this test as a characterization method for crystalline silicon cells. A measurement system is implemented with a CCD camera and a computer-operated power supply, and a sample holder where the cell to be characterized is placed. Imaging is performed at different polarization levels to validate the linearity of the sensor and perform quantitative analysis. Additionally, thermographic images of the cells are obtained with an infrared sensor.

With the images obtained, the range of linearity of the sensor is verified. Qualitative defect analyses and quantitative analyses of the series resistance and reverse saturation current density local variations are performed on three monocrystalline silicon cells and one polycrystalline silicon module. The voltage distribution of the module individual cells is determined in order to study the local variation in series resistance.

The quality of the images obtained demonstrated the possibilities in terms of equipment flexibility and adaptation to a wide range of samples for electroluminescence testing. Hence, the relevance of electroluminescence as non-destructive test method for applications of quality control, monitoring and characterization of solar cells and modules was verified.

## Índice general

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introducción.....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1      | Fundamentación y objetivo.....   | 5         |
| <b>2</b> | <b>Marco Teórico .....</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1      | Celdas solares .....   | 7         |
| 2.2      | Caracterización de celdas solares .....  | 11        |
| 2.3      | Electroluminiscencia.....  | 16        |
| 2.4      | Termografía infrarroja .....   | 27        |
| <b>3</b> | <b>Metodología y Desarrollo.....</b>   | <b>29</b> |
| 3.1      | Descripción general del sistema .....  | 29        |
| 3.2      | Descripción de los sensores .....  | 30        |
| 3.3      | Procesamiento de los datos .....   | 33        |
| 3.4      | Desarrollo de los ensayos .....  | 34        |
| <b>4</b> | <b>Caracterización de dispositivos fotovoltaicos mediante imágenes de EL e IRT</b> | <b>37</b> |
| 4.1      | Caracterización de celdas de silicio monocristalino .....                          | 37        |
| 4.1.1    | Mediciones preliminares.....   | 38        |
| 4.1.2    | Imágenes de electroluminiscencia.....  | 40        |
| 4.1.3    | Análisis cualitativo de las imágenes de electroluminiscencia.....                  | 43        |
| 4.1.4    | Análisis cuantitativo de los datos .....   | 45        |
| 4.2      | Caracterización del panel de silicio policristalino .....                          | 55        |
| 4.2.1    | Mediciones preliminares.....   | 56        |
| 4.2.2    | Obtención de imágenes de electroluminiscencia.....                                 | 57        |
| 4.2.3    | Análisis cualitativo de las imágenes de electroluminiscencia.....                  | 58        |
| 4.2.4    | Análisis cuantitativo de los datos .....   | 59        |
| 4.2.5    | Apreciaciones generales sobre la metodología.....                                  | 65        |
| <b>5</b> | <b>Conclusiones .....</b>  | <b>67</b> |
| 5.1      | Recomendaciones a futuro .....   | 68        |
| <b>6</b> | <b>Bibliografía .....</b>  | <b>69</b> |

# 1 Introducción

La fotovoltaica constituye un campo de investigación emergente, debido al progreso tecnológico y el enorme crecimiento de la industria en los últimos años. El interés creciente en las celdas solares como fuente de energía renovable empezó en los años setenta al reconocerse ampliamente las limitaciones de los recursos fósiles y la necesidad de un enfoque sustentable en el cumplimiento de la demanda energética. Hoy en día, la fotovoltaica se está transformando en una opción fuertemente competitiva en generación de electricidad alrededor del mundo, mostrando un sostenido crecimiento global interanual del orden de 200 GW, alcanzando un total de 1000 GW instalados mundialmente. [1]

El silicio policristalino sigue siendo la tecnología dominante en el mercado, pero ha incrementado la participación de la tecnología monocristalina, y otras tecnologías más eficientes tales como la celda PERC, heterojunturas, y celdas de contactos posteriores. Como consecuencia, existe una importante demanda de investigación en este sector, y muchas cuestiones científicas y tecnológicas relevantes aún por resolver. El desarrollo tecnológico en fotovoltaica apunta a las más altas eficiencias de conversión por el menor costo posible. Para ello, es indispensable alcanzar el mejor entendimiento posible acerca de las celdas y materiales fotovoltaicos. La caracterización de celdas es una herramienta fundamental para acercarnos a dicho entendimiento.

En particular, la caracterización por ensayo de electroluminiscencia (abreviadamente EL) es una práctica ya establecida en el campo fotovoltaico. Si bien la operación normal de una celda solar es mediante la absorción de la radiación solar y su conversión en corriente eléctrica, este método se basa en el proceso inverso. Inyectar corriente en la celda provoca la emisión de radiación que puede ser detectada por un sensor. El método permite obtener imágenes de EL o también realizar mediciones de EL espectrales. Este texto trata el primer caso; la obtención de imágenes de EL permite identificar defectos que no son visibles a simple vista, así como el cálculo de parámetros físicos característicos de la celda, tales como la resistencia serie y la longitud de difusión.

## 1.1 Fundamentación y objetivo

La caracterización por ensayo de electroluminiscencia ha sido utilizada desde los años 90, con un crecimiento importante luego de una publicación de Fuyuki et al. en 2005 que

demostró por primera vez las reales ventajas de este método [2]. Se demostró que la emisión de EL podía ser detectada por una cámara CCD en cuestión de menos de un segundo a algunos minutos, dependiendo de la celda ensayada y la tensión aplicada. De esta forma, fue posible obtener información de la emisión de EL en función de la posición en todo el área de la celda.

La detección de defectos mediante el ensayo de EL lo va transformado en una valiosa técnica de control de calidad y monitoreo de celdas y módulos solares. Una imagen de EL permite identificar variaciones en la calidad de la oblea, la presencia de impurezas y dislocaciones en el material, y defectos como microfracturas, interrupciones de dedos en la grilla de contactos, defectos en la soldadura, y cortocircuitos en celdas y módulos. Diversos estudios apuntan también a la caracterización de celdas mediante la medición espacial de parámetros ópticos y electrónicos de la celda, como la tensión, la resistencia serie, la longitud de difusión, o la reflectancia de la cara posterior.

El atractivo de los resultados de este ensayo reside en la alta resolución de las imágenes combinada con la simplicidad y rapidez de las mediciones, que lo hacen superior a técnicas alternativas como la de corriente inducida por haz de luz LBIC. Es un método flexible, pudiéndose utilizar para visualizar desde defectos microscópicos a módulos completos. La combinación de este método con la termografía infrarroja IRT presenta aún mejores resultados en el análisis de defectos y de pérdida de potencia.

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización de celdas por ensayo de EL espacial, implementando un sistema de medición y procesamiento de datos dedicado a este fin. El sistema debe contar con un recinto oscuro con un soporte para la cámara digital y para la muestra, además de un sistema de polarización y un sistema de medición de la temperatura. La caracterización se realizará mediante el análisis comparativo de imágenes.

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Celdas solares

La absorción de la luz puede excitar a un electrón a un estado de energía más alto, que luego puede trasladarse a un circuito externo que utilice su energía, volviendo así a su estado inicial. Este es el proceso de conversión de energía fotovoltaica que se lleva a cabo en una celda solar, representada en la Figura 2.1. Su núcleo de funcionamiento es la unión p-n, una unión entre un semiconductor dopado con átomos aceptores y otro con átomos donadores.

Una vez ocurrida la absorción del fotón, el par electrón-hueco es separado, viajando hacia los contactos eléctricos y al circuito externo, tal como se muestra en la Figura 2.1. La separación de los portadores de carga en direcciones opuestas produce una corriente eléctrica, y, por otro lado, evita la recombinación, proceso de pérdida inverso a la absorción, en el cual el electrón libre es capturado por un hueco. El movimiento de los portadores de carga en la fotovoltaica está determinado generalmente por la fuerza eléctrica y por los gradientes de concentración en el material, generándose así corrientes de arrastre por campo eléctrico y corrientes de difusión.

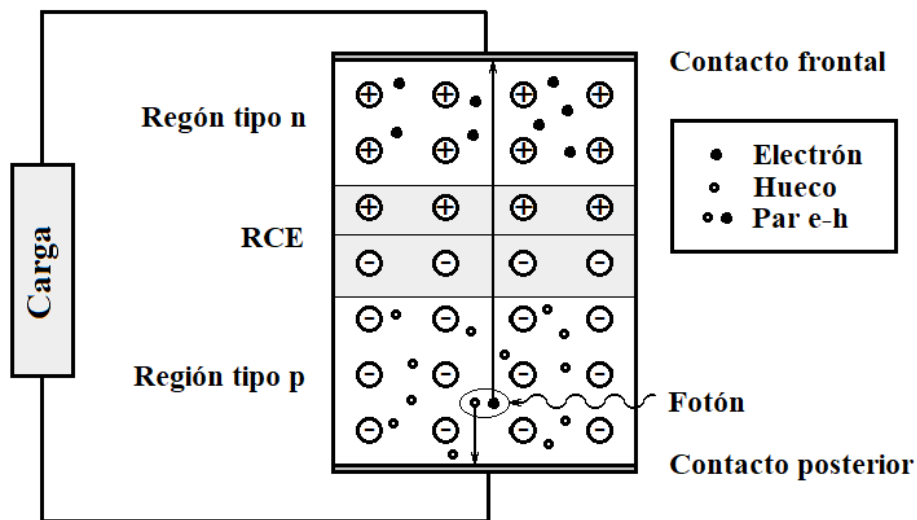


Figura 2.1: Ilustración de la unión p-n y el proceso de separación de cargas fotogeneradas.

Una vez realizada la unión p-n, ocurre la difusión de huecos y electrones libres desde la zona p y n hacia la zona opuesta. En el camino, la recombinación de tales portadores deja al descubierto lo que se denomina la región de carga espacial RCE, compuesta por los

átomos donadores ionizados. Por lo tanto, en la RCE aparece un campo eléctrico que se opone a la difusión de portadores, hasta que la unión alcanza el equilibrio termodinámico.

El sentido de polarización directa de diodos o celdas solares, ocurre cuando se le aplica una tensión tal que el campo eléctrico formado por la unión p-n se reduce, preponderando la corriente de difusión, dando origen a la corriente eléctrica a través del dispositivo. La difusión de portadores luego de cruzar la RCE conduce a la recombinación, por lo que la corriente de difusión que circula en polarización directa es una corriente de recombinación.

Esto se puede visualizar mediante los diagramas de bandas de energía de la celda, que se muestran en la Figura 2.2. El diagrama unidimensional muestra la energía máxima de la banda de valencia  $E_V$  y la energía mínima de la banda de conducción  $E_C$ , en función de la posición dentro del semiconductor. En equilibrio termodinámico (diagrama A), el diagrama también incluye la energía de Fermi  $E_F$ , parámetro de la distribución de Fermi, que modela la ocupación de estados para electrones en un material sólido. La energía de Fermi corresponde al nivel de energía para el cual la probabilidad de ocupación de los estados es 0.5.

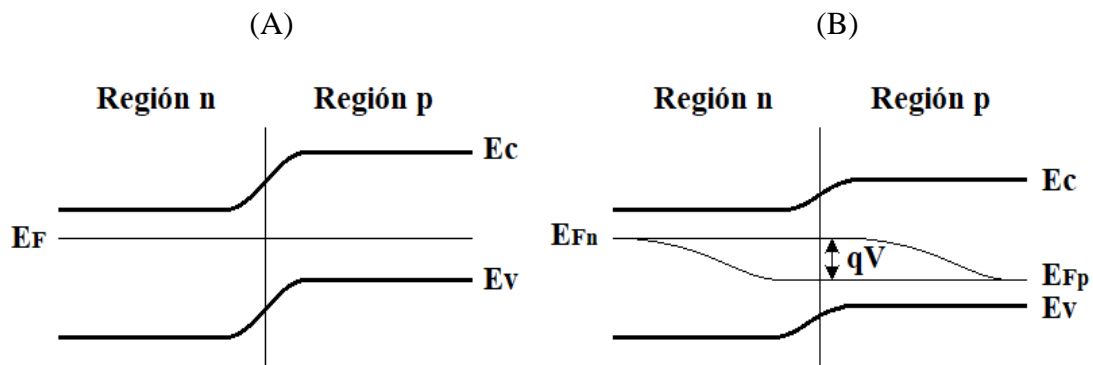


Figura 2.2: Diagrama de bandas de la unión p-n en equilibrio termodinámico (izquierda) y fuera del equilibrio (derecha).

Fuera del equilibrio (diagrama B), este concepto se reemplaza por el de energías de cuasi-Fermi  $E_{Fp}$  y  $E_{Fn}$ , que determinan por separado la concentración de huecos y la concentración de electrones, respectivamente. En el diagrama de bandas, las pendientes de los niveles de cuasi-Fermi están relacionados a las corrientes eléctricas, y la diferencia  $E_{Fn} - E_{Fp}$  entre los extremos está relacionada a la diferencia de potencial en los contactos de la celda solar. La separación de estos niveles indica entonces el grado de alejamiento



del equilibrio termodinámico y se produce por la iluminación de la celda y/o la aplicación de una tensión  $V$  en los bornes de la misma.

El diagrama también es muy útil para representar la absorción y la recombinación en las celdas, tal como se muestra en la Figura 2.3. Existen distintos procesos de absorción de fotones; la absorción interbanda ocurre cuando un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción, llevando a la generación de un par electrón hueco (par e-h). Por otro lado, la recombinación ocurre cuando un electrón regresa a un estado desocupado en la banda de valencia (hueco), es decir, se destruye el par e-h.

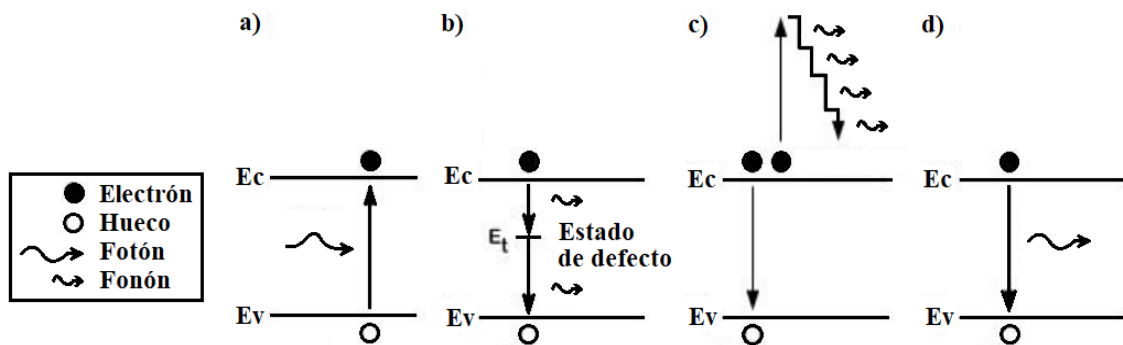


Figura 2.3: a) Proceso de absorción en el material semiconductor y principales mecanismos de recombinación, b) recombinación por defectos, c) recombinación Auger y d) recombinación radiante.

Si la recombinación lleva a la emisión de un fotón, se conoce como recombinación radiante, proceso que se muestra en la Figura 2.3. Otras formas de recombinación no llevan a la emisión de fotones. En la recombinación de Auger, el electrón recombina con un hueco entregando la energía a un segundo electrón cercano al primero en la banda de conducción. El segundo electrón experimenta un incremento en su energía cinética y la disipa mediante la termalización, entregando varias veces la energía del fonón  $E_p$ , tal como se ilustra en la Figura 2.3. Por último, se muestra la recombinación por defectos; se refiere a los defectos de la red cristalina que poseen los materiales semiconductores reales, que producen estados de energía permitidos en la banda prohibida. Tales estados pueden capturar portadores de carga de las bandas o servir como intermediarios para la recombinación.

Los procesos de recombinación también se caracterizan de forma indirecta mediante dos parámetros asociados; el tiempo de vida  $\tau$ , de aspecto temporal, y la longitud de difusión  $L$ , de aspecto espacial. Si bien son parámetros importantes pues determinan el desempeño de una celda en términos globales de operación y eficiencia, la definición del concepto en

cada caso proviene del comportamiento transitorio en el material. Para entenderlo más claramente, estos conceptos se introducen a continuación.

Si existe un exceso de concentraciones de electrones o huecos con respecto al equilibrio dinámico, los pares e-h comienzan a recombinar, y la concentración de portadores se reduce en un proceso transitorio. El tiempo que transcurre hasta que el exceso inicial se reduce en un factor  $1/e$ , se denomina tiempo de vida de los portadores, y engloba a todos los mecanismos de recombinación en el semiconductor descritos anteriormente.

En relación a la recombinación en el espacio, la longitud de difusión se define considerando un exceso de concentración de portadores en una coordenada dada en un material semiconductor, que difunden divergentemente con un perfil que decae exponencialmente. La constante de decaimiento del perfil exponencial es la longitud de difusión de los portadores, y es un concepto que indica la distancia promedio que pueden recorrer los portadores minoritarios desde el punto de generación hasta su recombinación. Altas longitudes de difusión son indicativas de materiales con mayores tiempos de vida. Ambas magnitudes se hallan vinculadas mediante la ecuación

$$L = \sqrt{D\tau} \quad 2.1$$

donde  $D$  es el coeficiente de difusión de portadores, o difusividad.

La recombinación y los parámetros de longitud de difusión y tiempo de vida son indicativos de la eficiencia de una celda. El impacto de ambas magnitudes se puede evaluar a través del concepto de eficiencia cuántica. La eficiencia cuántica externa EQE se define como la relación entre el número de portadores colectados en bornes de la celda y el número de fotones incidente, y se da en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) o de energía.

La Figura 2.4 muestra una curva genérica de eficiencia cuántica de una celda solar, en color negro, y la eficiencia cuántica de una celda ideal, en color gris. Si todos los fotones incidentes en una cierta longitud de onda son absorbidos y los correspondientes portadores de carga minoritarios no recombinan y son colectados como corriente eléctrica en los contactos de la celda, la eficiencia cuántica es 1. Por otro lado, si los fotones incidentes tienen energía inferior al ancho de banda prohibido (lo que ocurre a mayores longitudes de onda), la eficiencia cuántica será nula, debido a que ninguno será absorbido.

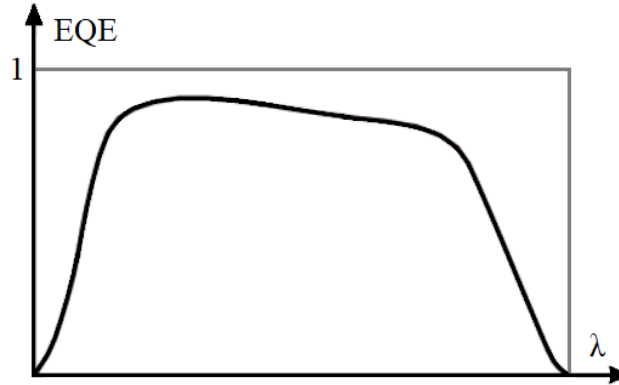


Figura 2.4: Eficiencia cuántica de una celda solar. Fuente: [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org).

Distintos mecanismos de recombinación modifican la curva de eficiencia cuántica según la forma en que los fotones son absorbidos en la celda. La recombinación en la superficie frontal reduce la eficiencia cuántica a menores longitudes de onda, mientras que la recombinación en la superficie trasera afecta la eficiencia cuántica a mayores longitudes de onda. Una reducción generalizada a lo largo de la curva puede atribuirse además a efectos como la reflexión de la luz incidente. Por lo tanto, la obtención de la curva de eficiencia cuántica de una celda proporciona información valiosa respecto de su desempeño y los procesos de pérdida que en ella rigen. Más adelante veremos que la eficiencia cuántica se vincula directamente con la electroluminiscencia, magnitud sobre la que se enfoca el presente trabajo.

En definitiva, si bien la teoría permite entender el funcionamiento de las celdas y los mecanismos que lo gobiernan, es a través de procesos de caracterización (tales como la obtención de la EQE o la electroluminiscencia) que se puede obtener información real de sus propiedades ópticas y eléctricas para evaluar su desempeño y posibilidades de mejora y optimización. A continuación, se exponen los principales métodos de caracterización de celdas solares.

## 2.2 Caracterización de celdas solares

La expresión  $J(V)$  de la celda solar, que se muestra en la ecuación 2.2, contempla la recombinación tanto en las zonas neutrales, en el primer término, como en la RCE, en el segundo término [3]. Contempla efectos resistivos del transporte de portadores mayoritarios, expresados con una resistencia serie  $R_S$  y una resistencia paralelo  $R_P$ . Finalmente, el cuarto término contempla el comportamiento óptico mediante  $I_{\text{foto}}$ , que

abarca la generación de pares e-h cuando se ilumina el material semiconductor con un flujo de fotones [3].

$$I = I_{01} \left( \exp \left( \frac{V - IR_S}{n_1 V_T} \right) - 1 \right) + I_{02} \left( \exp \left( \frac{V - IR_S}{n_2 V_T} \right) - 1 \right) + \frac{V - IR_S}{R_P} - I_{\text{foto}} \quad 2.2$$

Los primeros dos términos,  $I_1$  e  $I_2$ , son las denominadas corrientes a oscuras, producidas con los mecanismos de difusión y recombinación. Se describen a través de factores de idealidad  $n_1$  y  $n_2$  respectivamente, y las corrientes  $I_{01}$  e  $I_{02}$  son las corrientes de saturación inversa de las regiones neutras y de la RCE, respectivamente. La corriente de saturación es una expresión de la recombinación en la celda; esto se puede expresar matemáticamente al considerar las ecuaciones [3]

$$I_{01} = qn_i^2 \left( \frac{D_n F_P}{N_A L_n} \right), \quad I_{02} = qn_i \left( \frac{W}{2\tau_0} \right). \quad 2.3$$

En la primera ecuación, de  $I_{01}$ , se asume una celda basada en obleas de semiconductor tipo p, las cuales comúnmente poseen una región mucho más dopada que la otra tal que  $N_A \gg N_D$ , y donde  $F_P$  es el factor geométrico derivado del modelo de la celda solar finita,  $D_n$  es el coeficiente de difusión de electrones,  $N_A$  es la concentración de átomos de dopaje aceptores, y  $L_n$  es la longitud de difusión de electrones. En la segunda ecuación, para  $I_{02}$ ,  $W$  es el ancho de la RCE, y  $\tau_0$  es el tiempo de vida considerando la recombinación por defectos como el mecanismo de recombinación dominante. En ambos casos se observa como un aumento en los parámetros asociados a la recombinación,  $L_n$  y  $\tau_0$ , llevaría a menores corrientes de saturación inversa, y por ende a una reducción en las corrientes de recombinación  $I_1$  e  $I_2$ , representativas de las pérdidas por recombinación en la celda.

El circuito equivalente correspondiente al comportamiento expresado en la ecuación 2.2 se muestra en la Figura 2.5. La fotogeneración se modela mediante una fuente de corriente  $I_{\text{foto}}$ , y las corrientes de recombinación se modelan mediante dos diodos, que consumen una corriente  $I_1$  e  $I_2$ . Las pérdidas resistivas se modelan mediante resistencias  $R_S$  y  $R_P$ .

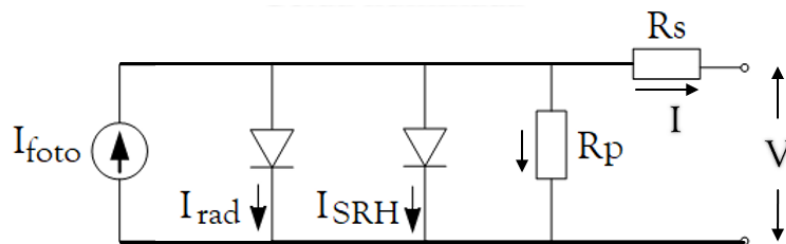


Figura 2.5: Circuito equivalente de la celda solar real tipo p-n.

La resistencia serie  $R_S$  modela la resistividad de los materiales por los cuales circulan los portadores de carga en su camino desde los extremos de la RCE hasta los bornes de la celda. Corresponde entonces a la suma de todas las resistencias individuales que se presentan en la celda solar, incluyendo las resistencias en los contactos eléctricos, la grilla metálica, el material semiconductor y cualquier otro componente eléctrico en el circuito. La Figura 2.6 muestra la distribución espacial de  $R_S$  en una celda.

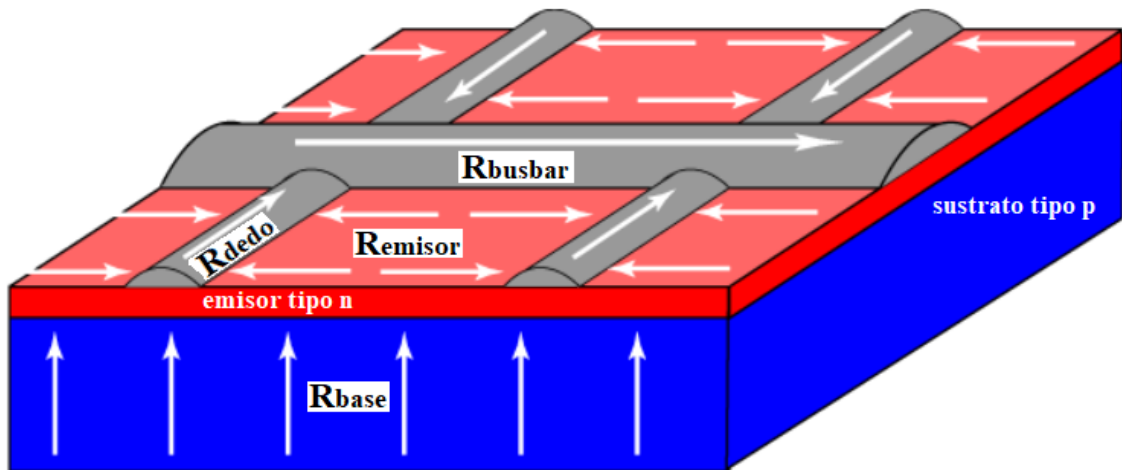


Figura 2.6: Distribución espacial de  $R_S$  y flujo de electrones en una celda solar. Fuente: [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org).

Por otro lado, existe otro efecto resistivo originado por defectos en la fabricación de la junta, que se manifiesta como pérdida parásita de corriente. La celda puede poseer, por ejemplo, un *shunt*, es decir, un camino de baja resistencia que actúa como una rama en paralelo del circuito, en lugar de seguir la ruta normal a través de las zonas n y p. Las pérdidas de este tipo se modelan por la resistencia paralelo  $R_P$ . Una celda ideal tiene  $R_S = 0$  y  $R_P = \infty$ .

La obtención de los parámetros del circuito equivalente es posible mediante los ensayos de caracterización de las celdas solares. Para la medición de la curva de corriente-tensión, es necesario iluminar la celda, buscando la mejor aproximación posible al espectro solar. Manteniendo la temperatura de la celda constante, se aplica tensión a la celda y se mide la corriente simultáneamente. Se obtienen así los puntos de corriente-tensión haciendo variar la tensión a lo largo de toda la curva, que se muestra en la Figura 2.7 junto con el esquema básico del ensayo.

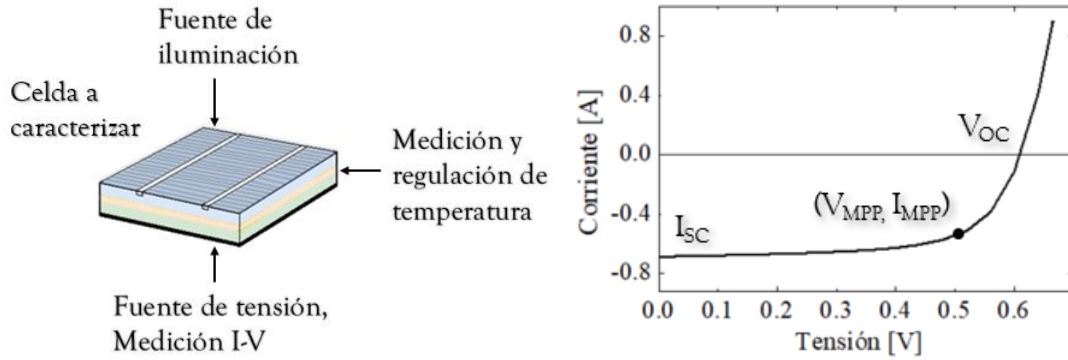


Figura 2.7: Medición de la curva corriente-tensión bajo iluminación; esquema básico (izquierda) y curva de corriente-tensión y potencia-tensión (derecha).

En la curva se marcan 3 puntos de interés; la corriente de cortocircuito  $I_{SC}$ , cuando  $V = 0$ , la tensión de circuito abierto  $V_{OC}$ , cuando  $I = 0$ , y el punto de máxima potencia  $P_{MPP} = I_{MPP} V_{MPP}$ . La medición de la curva permite obtenerlos de forma inmediata. Con estos parámetros, se definen otros conceptos importantes: la eficiencia  $\eta$  y el factor de forma FF, dados por las ecuaciones

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{inc}} = \frac{V_{MPP} |I_{MPP}|}{P_{inc}} \quad 2.4$$

donde  $P_{inc} = A (100 \text{ mW/cm}^2)$  es la potencia radiante incidente en condiciones estándar de iluminación solar, y  $A$  es el área de la celda. La Figura 2.7 (trazo azul) muestra la curva de potencia-tensión. El factor de forma viene dado por

$$FF = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad 2.5$$

Como se observa de la ecuación 2.5, el factor de forma contiene información de la potencia máxima de una celda solar. El nombre se debe a que el parámetro relaciona la potencia máxima con el área del rectángulo más grande que puede caber dentro de la curva corriente-tensión, dado por el producto  $V_{OC} \times I_{SC}$ . Es posible representar la eficiencia mediante la definición de FF

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{inc}} \quad 2.6$$

mediante la cual es posible apreciar la importante relación entre la eficiencia y los parámetros  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ . El parámetro  $V_{OC}$  es de particular interés debido a su relación con  $I_0$ . Considerando parámetros genéricos correspondientes al mecanismo de recombinación dominante en la celda solar con una idealidad  $n_{id}$ , se puede escribir [3]

$$V_{OC} = n_{id} V_T \ln \left( \frac{I_{foto}}{I_0} \right) \quad 2.7$$

Estas ecuaciones describen entonces una vinculación entre la recombinación en la celda, mediante  $I_0$ , y su eficiencia, mediante  $V_{OC}$ .

El siguiente ensayo a considerar, es la obtención de la curva de corriente-tensión a oscuras. La Figura 2.8 muestra la curva corriente-tensión a oscuras en una gráfica semilogarítmica. Esta representación permite identificar regiones de influencia de  $R_S$  y  $R_P$ , idealidades locales, corrientes de recombinación en la RCE a tensiones más bajas, y en las regiones neutrales a tensiones más altas.

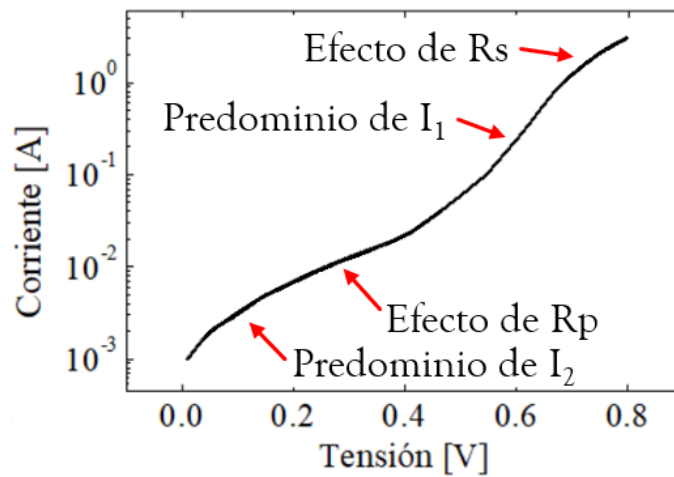


Figura 2.8: Curva de corriente-tensión a oscuras, en gráfica semilogarítmica.

La resistencia  $R_P$  puede obtenerse directamente de la pendiente de la curva de corriente-tensión, tanto a oscuras como iluminada, de acuerdo a su pendiente cerca de  $V = 0$ , es decir

$$R_P^{-1} = \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow 0} \quad 2.8$$

Para la obtención de  $R_S$  y  $n_{id}$ , existen varios métodos. Un primer análisis puede realizarse sobre la curva a oscuras, en base a la Figura 2.8; para una región acotada donde la tensión cumpla  $V \gg V_T$ , y asumiendo  $I_{foto} = -I_{SC}$  y  $R_P \gg R_S$ , la curva a oscuras resulta

$$I = I_0 \exp \left( \frac{V - IR_S}{n_{id} V_T} \right) \quad 2.9$$

De esta ecuación se desprenden dos análisis distintos. Por un lado, si consideramos que  $V \gg IR_S$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{V}{n_{id}V_T} \quad 2.10$$

Lo que significa que, al graficar  $\ln(I)$  en función de  $V$ , la inversa de la pendiente permite obtener la idealidad. Por otro lado, si se invierte la ecuación 2.9, y se deriva con respecto a  $I$ , se obtiene

$$\frac{dV}{dI} = n_{id}V_T I^{-1} + R_S \quad 2.11$$

Así, si se grafica  $dV/dI$  en función de  $I^{-1}$  se obtiene una recta con ordenada al origen  $R_S$  y pendiente  $n_{id}V_T$ .

### 2.3 Electroluminiscencia

La electroluminiscencia, o EL, consiste en la emisión de luz cuando a una celda se le aplica una tensión de polarización directa, es decir, realizando el proceso de conversión de luz a electricidad. Esto ocurre a través de la recombinación radiante; aunque los mecanismos predominantes en el silicio sean la recombinación de Auger y por defectos, la recombinación radiante es suficiente para ser detectada por un sensor externo.

Es así que surge el ensayo de caracterización de celdas solares por imágenes de EL; un método de alta resolución que permite rápidamente identificar zonas de alta recombinación radiante. Regiones de baja emisión de EL son indicativas de recombinación no-radiante y de pérdidas resistivas. Por lo tanto, mediante un análisis cuantitativo es posible obtener además un mapa de las caídas de tensión resistivas para los puntos sobre el área de la celda.

Es entonces natural en este tipo de estudio hacer referencia a parámetros locales y variaciones laterales en los mismos. Para referencia futura, cuando el texto hace mención a algún parámetro como local, es debido a que su magnitud está sujeta a la posición dentro del área superficial de la celda en que se mide (como ejemplo, tensión local o resistencia serie local en una posición  $r$  en la celda). Asimismo, las variaciones laterales son variaciones en las magnitudes en función de la posición que se dan en la celda (por ejemplo, variación lateral de la resistencia serie). La Figura 2.9 muestra una representación de una celda solar, donde se marca una posición arbitraria  $r$  en su



superficie. La imagen también representa la grilla de contactos compuesta por *busbars* y dedos (en color gris claro), que permiten la absorción de la luz y la recolección de corriente a los bornes de la misma.

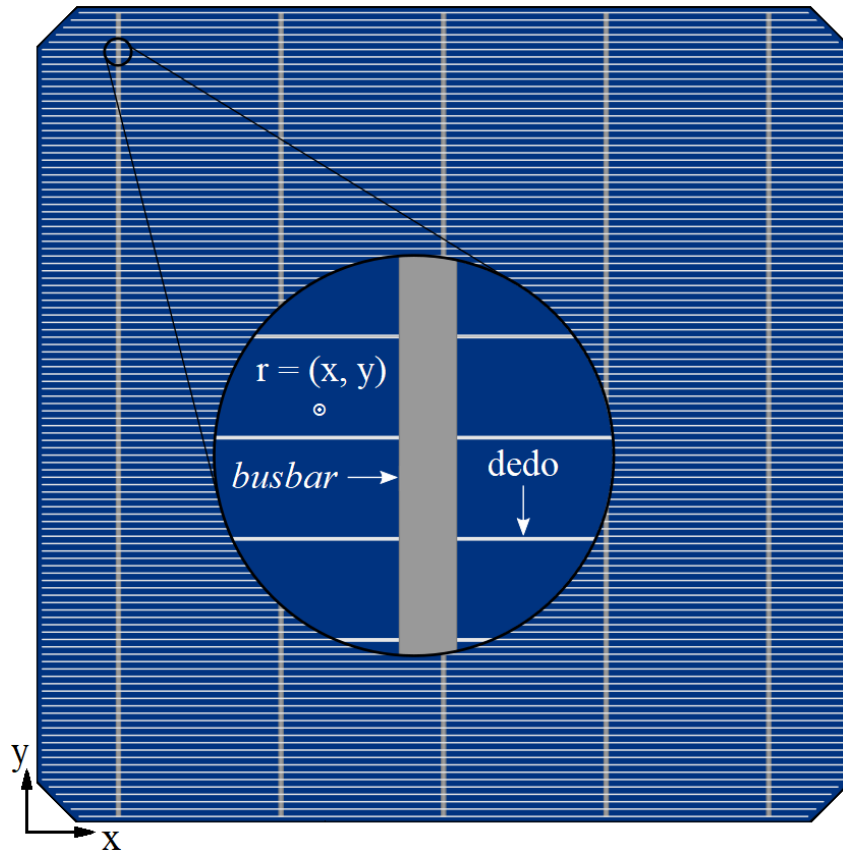


Figura 2.9: Representación de una celda solar con su grilla de contactos.

El esquema básico del ensayo de EL se muestra en la Figura 2.10. El sistema cuenta con una fuente de alimentación, una cámara CCD, y un receptáculo para evitar que la luz ambiente interfiera en las mediciones.

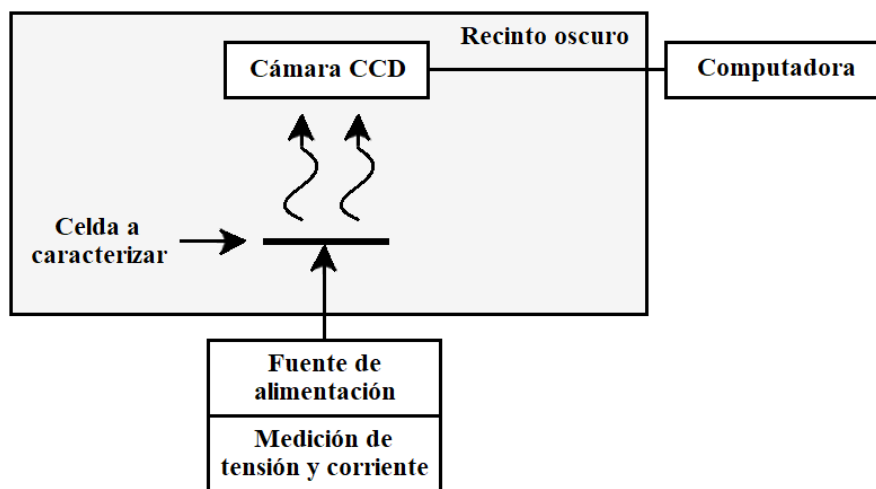


Figura 2.10: Esquema básico del ensayo de electroluminiscencia.

Las cámaras más utilizadas para este propósito contienen dispositivos CCD (dispositivos de carga acoplada), similares a los utilizados en cámaras digitales, pero con sensibilidad optimizada en un rango cercano al infrarrojo y con enfriamiento activo del sensor CCD para reducir el ruido térmico. Las cámaras CCD de silicio son ampliamente utilizadas a este fin debido a su relativamente bajo costo y bajo niveles de ruido. Sin embargo, para la caracterización de celdas de silicio, cuya emisión luminiscente ocurre a partir de los 1050 nm, estas cámaras poseen la desventaja de una baja respuesta para longitudes de onda superiores a 1000 nm. Una alternativa reside en los dispositivos con fotodiodos de InGaAs, que tienen muy buena respuesta en el rango de 1000 a 1300 nm, pero que poseen un costo significativamente mayor.

El principio teórico de la detección de electroluminiscencia de celdas solares se basa en el teorema de reciprocidad, que establece que la intensidad de EL emitida en cualquier posición  $r = (x, y)$  de la superficie de una celda viene dada por [4]

$$\Phi_{em}(E, r) = EQE(E, r) \phi_{bb}(E) \exp\left(\frac{V(r)}{V_T} - 1\right) \quad 2.12$$

donde EQE es la eficiencia cuántica externa local,  $V$  es la tensión interna en la juntura,  $E$  es la energía del fotón y  $V_T$  es la tensión térmica. El flujo espectral de fotones de un cuerpo negro está dado por la ecuación de Planck

$$\phi_{bb}(E) = \frac{2\pi E^2 / (h^3 c^2)}{\exp(E/kT) - 1}, \quad 2.13$$

donde  $h$  es la constante de Planck y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. De la ecuación 2.12 se pueden tomar ciertas conclusiones; en primer lugar, asumiendo que el sensor es lineal, la dependencia de la señal de EL con la tensión aplicada en polarización directa tiene la misma forma funcional que la característica de corriente-tensión a oscuras medida experimentalmente, que contempla la totalidad de los mecanismos de recombinación. Sin embargo, es necesario resaltar algunas consideraciones, partiendo de un desarrollo previo. Los tiempos de vida de los diferentes mecanismos de recombinación en una celda pueden expresarse mediante un tiempo de vida neto  $\tau_n$  (y de forma análoga  $\tau_p$  para huecos) [3], dado por

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{n,rad}} + \frac{1}{\tau_{n,Auger}} + \frac{1}{\tau_{n,SRH}} \quad 2.14$$

donde  $\tau_{n,rad}$  corresponde al mecanismo de recombinación radiante,  $\tau_{n,Auger}$  a la recombinación de Auger, y  $\tau_{n,SRH}$  a la recombinación por niveles de defectos. Estos

mecanismos se reflejan en distintas componentes de la corriente de saturación, como se muestra a continuación. Considerando por ejemplo la corriente de saturación  $I_{01}$  (ecuación 2.3), que presenta una relación de proporcionalidad con  $1/L_n$ ,

$$I_{01} = qn_i^2 \left( \frac{D_n F_P}{N_A L_n} \right) \quad 2.15$$

y teniendo en cuenta que  $L_n^2 = D_n \tau_n$ , podemos reescribirla según

$$I_{01} = qn_i^2 \left( \frac{\sqrt{D_n} F_P}{N_A \sqrt{\tau_n}} \right) \quad 2.16$$

Teniendo en cuenta la ecuación (2.13) vemos que también la corriente de saturación  $I_{01}$  puede separarse según

$$I_{01} = I_{01,rad} + I_{01,Auger} + I_{01,SRH} \quad 2.17$$

Resulta así que la curva de corriente-tensión a oscuras de la celda puede entenderse mediante las corrientes de saturación inversas como el resultado del efecto simultáneo de distintos mecanismos de recombinación. Debido a la naturaleza del ensayo de EL, se espera entonces una correspondencia entre la dependencia de la señal de EL con la tensión y la curva a oscuras para  $I_{0,rad}$ .

En segundo lugar, la ecuación 2.12 refleja que las variaciones locales de  $\phi_{em}$  son debidas solamente a variaciones locales de la eficiencia cuántica externa, que representa las pérdidas ópticas y por recombinación, y de la tensión interna, que representa las pérdidas resistivas. Esto puede observarse cuando la celda presenta defectos locales o variaciones locales de sus propiedades ópticas o electrónicas. La detección de tales particularidades es posible mediante una imagen de EL.

A modo de ejemplo, la Figura 2.11 muestra una imagen de EL obtenida de un módulo de silicio monocristalino con varios defectos de fabricación [5], con algunos mostrados mediante rectángulos amarillos y rojos. Estos defectos no son visibles a simple vista, pero si se distinguen claramente en la imagen de EL. Los detalles y zonas oscuras pueden tener distintas causas, ocurridas en la fabricación, transporte o instalación de las celdas o módulos.

Los defectos de fabricación tienen que ver con la estructura cristalina de la celda: las impurezas atómicas, bordes de grano, u otros defectos cristalinos. Mientras que otros problemas de fabricación, instalación, y fracturas pueden impedir que la corriente de polarización llegue a ciertas áreas de la célula, resultando igualmente en zonas oscuras en

la imagen de EL. Otros problemas eléctricos, como la falta de conexión eléctrica en ciertas áreas de la celda, pueden también resultar en zonas oscuras.

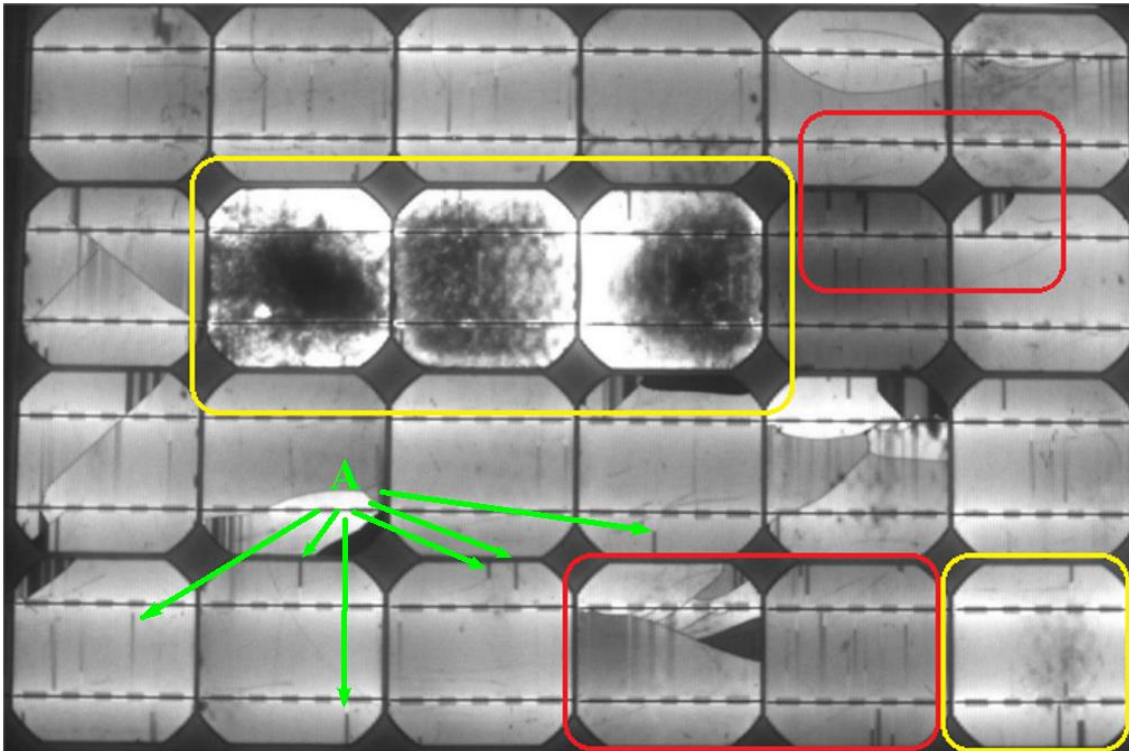


Figura 2.11: Imagen EL de un panel solar de silicio monocristalino, con defectos de fabricación marcados en amarillo, y otros defectos marcados en rojo; micro fracturas, mala conexión a los busbars y dedos cortados.

En varios casos se puede lograr una primera determinación de la causa de estos detalles, simplemente mediante la inspección de la imagen de EL. Algunos ejemplos señalados con A en la Figura 2.11 muestran interrupciones de dedos (zonas oscuras de forma rectangular fina perpendiculares a los *busbars* de las celdas) y fracturas que desconectan regiones de la celda de las demás. También se observan defectos de fabricación que producen marcas señaladas en amarillo.

Otra observación reside en una reducción generalizada de la señal en regiones alejadas de los *busbars* que se puede asociar a un aumento de la resistencia serie debido al mayor camino recorrido por la corriente. En la Figura 2.12, se representa en rojo el recorrido de la corriente en el ensayo de EL de una celda. La corriente se inyecta en sus bornes, y recorre la grilla de contactos hasta entrar a la celda en un punto señalado con (X). Debido a la resistencia de los dedos de la grilla de contactos, la corriente que entra a la celda en un punto determinado será menor si debe recorrer una mayor distancia respecto a los *busbars*, como es el caso del punto (Y). Además del efecto observado en la imagen de EL, esto también se evidencia en las imágenes térmicas. Más adelante, veremos que en

los *busbars* se observan mayores temperaturas, mientras que, en regiones más alejadas, la reducción en la corriente lleva a menores temperaturas.

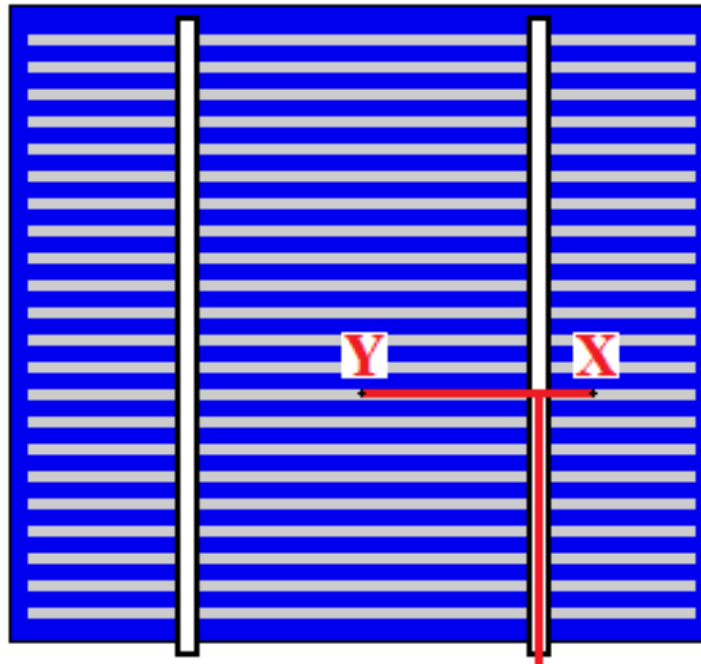


Figura 2.12: Ejemplo del recorrido de la corriente en el ensayo de EL de una celda, desde su inyección en bornes hasta los puntos X e Y, donde la corriente entra a la celda.

En síntesis, es considerable la variedad y riqueza de los datos contenidos en una imagen de EL. Cada pixel contiene información sobre los efectos resistivos, ópticos y de recombinación que pueden distinguirse debido a la diferente forma en que dependen de la energía E y de la tensión V. En particular, la dependencia con la tensión permite realizar algunos análisis cuantitativos si se dispone de dos imágenes a dos tensiones distintas, una más baja  $V_b$ , y otra más alta  $V_a$ .

Un ejemplo de esto reside en el comportamiento de los efectos resistivos, y los *shunts*. En el caso de variaciones laterales en la resistencia serie de una celda debido a algún defecto en su estructura, las variaciones resaltarán en la imagen de EL a una tensión más elevada  $V_a$ , mientras que tienen un efecto reducido en la imagen de EL a una tensión más baja  $V_b$ , debido a que la corriente que circula es menor, y por ende la caída de tensión a través de la resistencia también será menor.

Sin embargo, esto no ocurre en el caso de *shunts*. El gran flujo de corriente a través del *shunt* lleva a caídas de tensión en las resistencias serie que conectan el punto de defecto a las áreas circundantes, llevando a la reducción de señal de EL observada [20]. Tal efecto es notable aún a bajos niveles de polarización, ya que la corriente que circula a través del

*shunt* sigue siendo significativa en comparación a las intensidades típicas en la celda [17]. Esto permite evaluar la incidencia de efectos resistivos o de *shunts* en imágenes de EL. En la sección siguiente se brinda un método alternativo que permite detectar también *shunts*, que es la termografía infrarroja.

Las caídas de tensión por efectos resistivos pueden obtenerse por las variaciones laterales en una imagen de EL, mediante el estudio de los perfiles, o gráficos que exhiben la magnitud medida en función del pixel a lo largo de una línea que cruza la imagen. Es posible modelar la EL partiendo de

$$\Phi_{em}(r) = C(r) \exp\left(\frac{V(r)}{V_T}\right) \quad 2.18$$

donde  $C(r)$  es un factor de calibración que comprende las propiedades de recombinación y los factores ópticos del arreglo experimental y la muestra [5]. Entonces, si se asume un patrón de recombinación homogéneo se puede llegar a la sencilla ecuación de la diferencia de tensión entre dos puntos dada por [5]

$$dV(r_1, r_2) = V_T \ln\left(\frac{\Phi_{em}(r_1)}{\Phi_{em}(r_2)}\right) \quad 2.19$$

Si se utiliza esta ecuación para calcular la diferencia de tensiones entre varios puntos con respecto a un mismo  $r_2$ , despreciando variaciones locales en  $C(r)$ , se puede obtener una aproximación al perfil de tensión relativa. Es decir, no se conoce el valor absoluto de la tensión local en cada punto, sino la diferencia entre la tensión en cada punto y un punto de referencia.

Otro método cuantitativo de interés trata la posibilidad de determinar la variación local de la resistencia serie en una celda, mediante la expresión [6]

$$R_S(r) = \frac{V_{ext} - V(r)}{j(r)} = \frac{V_{ext} - V(r)}{j_0(r) \exp\left(\frac{V(r)}{V_T}\right)}, \quad 2.20$$

donde  $V_{ext}$  es la tensión aplicada a los contactos de la celda y  $j(r)$  es la densidad de corriente local, es decir en la posición  $r$ . Por lo tanto, en la ecuación 2.20 se aproxima la densidad de corriente local  $j(r)$  como la del modelo de un diodo, donde  $j_0(r)$  es la densidad de corriente de saturación inversa local. Tanto  $j_0(r)$  como  $V(r)$  son parámetros a determinar de la imagen de EL; existen distintos métodos con tal finalidad, mediante los cuales se obtienen imágenes o mapas de  $R_S$  y  $j_0$  locales. En particular, el método

propuesto por Dost et al. también emplea dos imágenes de EL, una a un bajo nivel de tensión, y otra a un más alto nivel de tensión [7].

El método de Dost parte de la ecuación 2.18 para la señal de EL. A bajas tensiones, las corrientes laterales son suficientemente bajas, de forma tal que la variación local de tensión es mucho menor que la tensión térmica (25 mV a temperatura ambiente), y por ende las tensiones locales se asumen iguales a la tensión aplicada a los terminales de la celda. Con la ecuación 2.18 se puede obtener  $C(r)$  si  $V(r) = V_b$ , es decir, utilizando la señal EL  $\phi_b(r)$  de una imagen tomada a una baja tensión aplicada  $V_b$ . Conociendo el valor de  $C(r)$ , se puede utilizar la misma ecuación para calibrar la señal EL de una segunda imagen, tomada a una mayor tensión de polarización  $V_a$ , a tensión local  $V_a(r)$ .

$$V_a(r) = V_T \ln \left( \frac{\phi_a(r)}{C(r)} \right) \quad 2.21$$

La tensión  $V_a(r)$  se utiliza entonces en la ecuación 2.4 para calcular la resistencia serie local  $R_S(r)$ . Sin embargo, falta conocer valor de  $j_0(r)$ . Métodos anteriores [18][19] asumían una aproximación tal que  $j_0(r) \approx 1/C(r)$ , que no es válida para celdas de silicio modernas donde ya no se cumple que el espesor de la celda sea mucho mayor que la longitud de difusión de los portadores de carga minoritarios [7]. Adicionalmente, una imagen a baja tensión requiere mayores tiempos de integración de la cámara.

Por lo tanto, el método de Dost implementa una nueva aproximación para la obtención de  $j_0$  y prescinde de la imagen de EL a baja tensión, utilizando en su lugar otra imagen a una tensión más elevada, para reducir los tiempos requeridos en el proceso del ensayo [7]. Cada iteración reduce así el error en la imagen de baja tensión, y luego la utiliza en las demás ecuaciones hasta lograr la convergencia de los resultados de resistencia serie. Para esto, el método se basa en la aproximación introducida por Breitenstein et al. [8]

$$j_0(r) \approx \frac{1 - C(r)/C_{\max}}{C(r)/C_{\max}} \quad 2.22$$

Aquí, una primera aproximación para  $C_{\max}$  corresponde al valor máximo de  $C$  que aparezca en la imagen. Luego, se propone variar  $C_{\max}$  hasta que se obtenga una buena separación entre efectos resistivos y de recombinación en los resultados de  $R_S$  y  $j_0$  respectivamente. Esta etapa del método se basa en que los contrastes de la imagen de EL se discriminan entre efectos asociados a la variación lateral de la resistencia serie, o la variación lateral de la densidad de corriente de saturación inversa. Se busca obtener

entonces un mapa que contenga solamente contrastes debido a la variación de la resistencia serie, por un lado, y otro mapa que contenga solamente contrastes debido a la variación de la densidad de corriente de saturación inversa, por otro lado. Si bien el autor logra una mejoría en la separación de efectos respecto a métodos anteriores, esa separación no es del todo nítida, como se demostrará en el capítulo 4.

Una vez establecido el valor de  $C_{\max}$ , puede utilizarse para todas las celdas solares que hayan sido procesadas idénticamente. Cabe resaltar que efectos ópticos como el viñeteado se incluyen en el resultado de  $C(r)$ , y deben ser corregidos antes de los cálculos.

Para evitar imágenes a muy bajos valores de tensión (lo que implica largos tiempos de exposición) y así acelerar el método, Dost et al. propone un enfoque iterativo, en el cual la primera imagen se toma a un valor más alto de tensión  $V_b$ , y luego se corrige esa tensión para llegar a cada valor local  $V_b(r)$  mediante la siguiente ecuación

$$V_b^{k+1}(r) = V_b - R_s^k(r) j_0^k(r) \exp\left(\frac{V_b^k(r)}{V_T}\right) \quad 2.23$$

Es decir que, en una primera aproximación,  $V_b^0(r) = V_b$ . El resultado de 2.23 se vuelve a utilizar en la ecuación 2.18 para determinar  $C(r)$ , y se repite el proceso hasta que los valores de  $R_s(r)$  convergen. La imagen resultante simplemente representa valores de contraste, debido a la aproximación utilizada para  $j_0$ . Si se conoce el valor global de resistencia serie para la celda,  $R_{Sg}$ , se puede obtener un factor de escala  $f$  tal que el valor medio de la imagen de resistencia serie  $R_{Sm}$  coincida con  $R_{Sg}$ :

$$f = \frac{R_{Sg}}{R_{Sm}} \therefore R_{Sf}(r) = f R_s(r) \wedge j_{of} = \frac{j_0(r)}{f} \quad 2.24$$

Para un mejor entendimiento del método de Dost, la Figura 2.13 muestra un diagrama de flujo de los pasos a realizar.

En síntesis, el mapa de  $R_s$  permite investigar de forma espacial las variaciones en resistencia serie de una celda. Esto representa una ventaja importante durante la fabricación de celdas, debido a que permite detectar los defectos que aumentan la resistencia serie, y su distribución sobre la extensión de la celda.



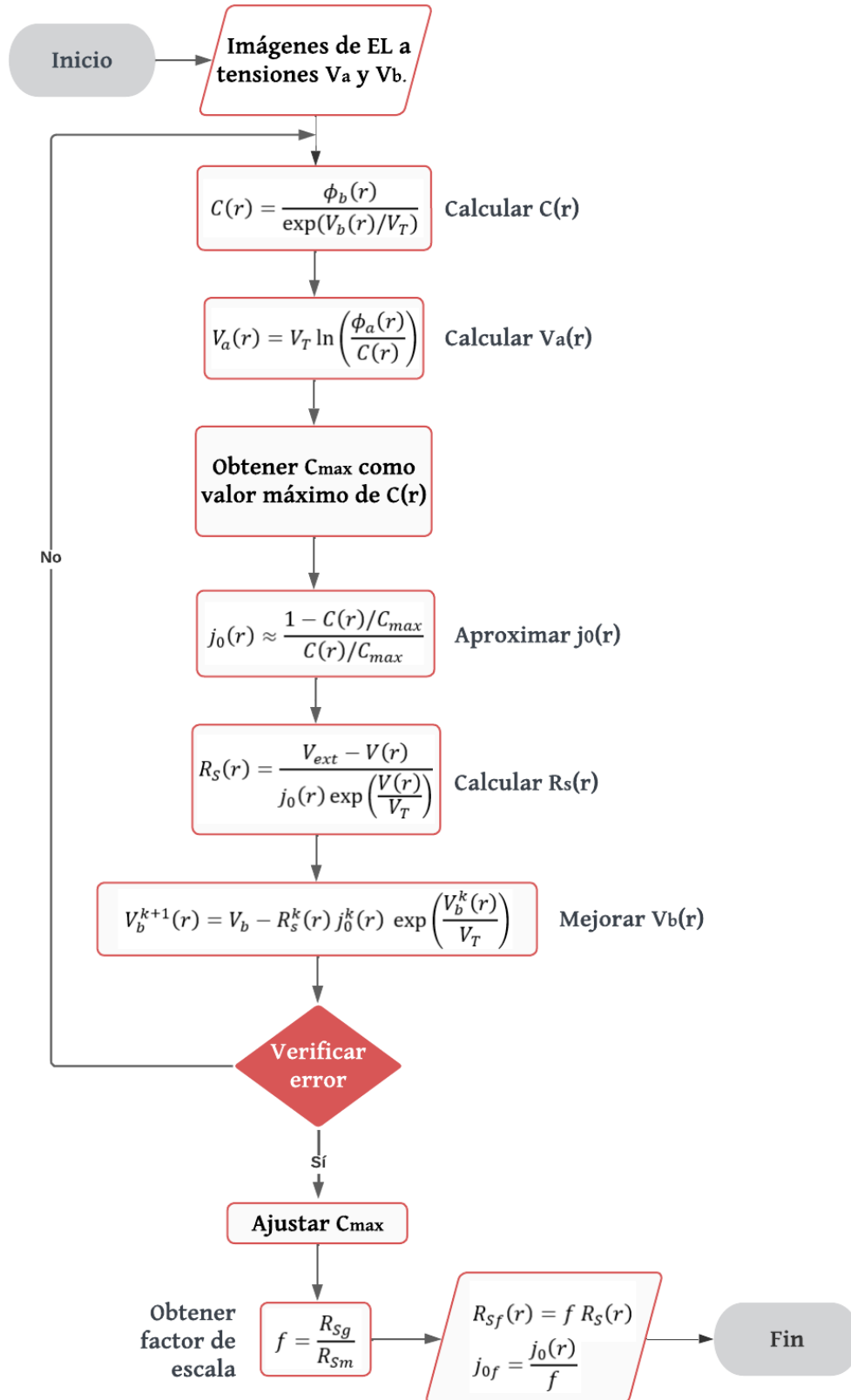


Figura 2.13: Diagrama de flujo describiendo el método de Dost para la obtención del mapa de  $R_s$ .

Si por otra parte se considera la ecuación 2.18 aplicada a un módulo solar, es posible obtener la distribución de los potenciales eléctricos en cada una de las celdas que lo componen mediante imágenes de EL. Esta información permite una mirada hacia el

interior del módulo y a cada celda que lo compone, además de la visión general proporcionada por la imagen de EL del módulo completo. Los resultados obtenidos pueden incluso utilizarse para aplicar a las celdas el método anterior para obtener mapas de resistencia serie e investigar defectos más a fondo [9]. La Figura 2.14 muestra un esquema simplificado de una celda que pertenece a un módulo, y los parámetros involucrados.

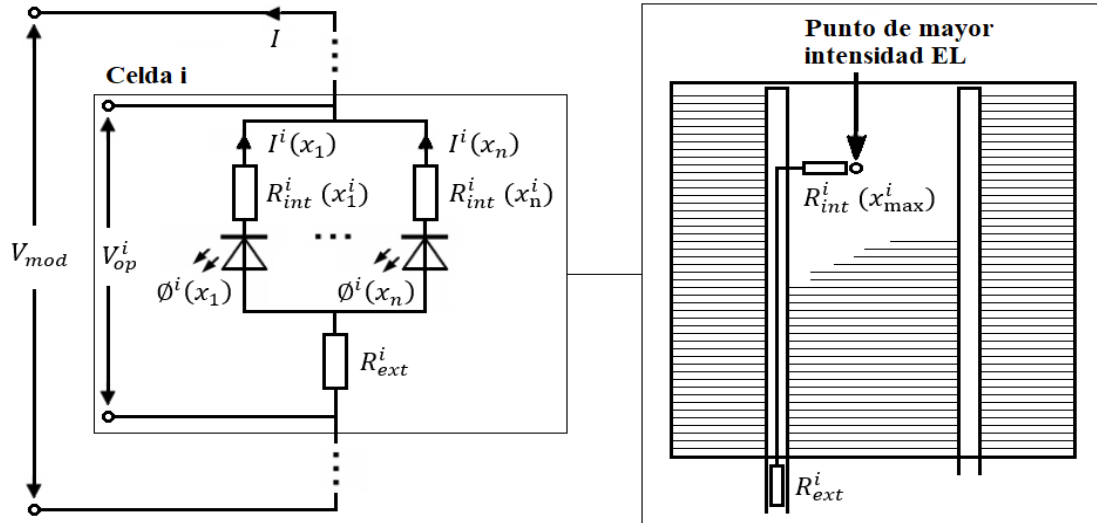


Figura 2.14: Esquema para determinar la distribución de los potenciales eléctricos en cada una de las celdas de un módulo solar.

Si la tensión local  $V(r)$  es un dato de la imagen de EL del módulo, para determinar la tensión de operación en terminales  $V_{op}^i$  de la celda  $i$ , se considera la caída de tensión desde el contacto externo del módulo hasta la posición  $r$ . Esto implica determinar la resistencia serie interna  $R_{int}^i$ , relacionada a la resistencia de la grilla de contactos y la resistencia entre la grilla de contactos y el material semiconductor. También está involucrada la resistencia externa  $R_{ext}^i$ , que abarca la resistencia de los contactos, la resistencia entre los contactos y la celda, y la resistencia de la base del semiconductor (típicamente la región  $p$  en celdas basadas en obleas tipo  $p$ ). La corriente  $I(r)$  es la corriente local que circula en la posición  $r$  y la corriente  $I$  es la corriente total suministrada al módulo.

$$\begin{aligned}
 V_{op}^i &= V^i(r) + R_{int}^i(r) I^i(r) + R_{ext}^i I \\
 &= V_T \ln \left( \frac{\phi^i(x_{max}^i)}{C} \right) + R_{ext}^i I
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

La ecuación 2.25 asume que los puntos de máxima emisión de EL  $x_{max}^i$  en cada celda se encuentran en regiones de buen contacto, donde la caída de tensión a través de la

resistencia serie  $R_{\text{int}}^i(x_{\text{max}}^i)$  puede despreciarse [9]. Asimismo, aunque las propiedades ópticas y materiales de las celdas pueden variar lateralmente, se asume que tales variaciones son comparables entre distintas celdas  $i$  en el punto de mayor emisión de EL en cada celda,  $x_{\text{max}}^i$ . Esto permite utilizar el mismo factor de calibración  $C = C^i(x_{\text{max}}^i)$  para todas las celdas del módulo.

Para obtener los parámetros  $R_{\text{ext}}^i$  y  $C$ , se considera que la tensión total aplicada en terminales del módulo equivale a la suma de las tensiones de operación de cada celda y la caída de tensión en las  $R_{\text{ext}}^i$ .

$$\begin{aligned} V_{\text{mod}} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{celdas}}} V_{\text{op}}^i \\ &= \sum_{i=1}^{N_{\text{celdas}}} V_T \ln \left( \frac{\phi^i(x_{\text{max}}^i)}{C} \right) + R_{\text{mod}} I \end{aligned} \quad 2.26$$

Donde  $N_{\text{celdas}}$  es el número de celdas en el módulo, y  $R_{\text{mod}}$  se calcula según

$$R_{\text{mod}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{celdas}}} R_{\text{ext}}^i \quad 2.27$$

Para determinar el valor de  $C$ , se requiere una imagen de EL a un nivel de polarización bajo, tal que  $I < 10\% I_{\text{SC}}$ , de forma que se puede despreciar el valor de  $R_{\text{ext}}^i I$  en la ecuación 2.26, resultando

$$C = \sqrt[N_{\text{celdas}}]{\frac{\prod_{i=1}^{N_{\text{celda}}} \phi^i(x_{\text{max}}^i)}{\exp\left(\frac{V_{\text{mod}}}{V_T}\right)}} \quad 2.28$$

Este resultado se puede aplicar a la ecuación 2.26 para obtener  $R_{\text{mod}}$ , para un valor dado de  $V_{\text{mod}}$  e  $I$  de polarización.

## 2.4 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja IRT se refiere a la detección y medición no-destructiva de la radiación infrarroja emitida por la superficie de cualquier cuerpo, y su representación en imágenes de distribución de temperaturas. El principio se basa en la ley de la radiación de cuerpo negro, que establece que cualquier objeto a una temperatura mayor que el cero absoluto emitirá radiación en un espectro continuo, cuyas características pueden utilizarse

para medir su temperatura. Los sensores infrarrojos detectan parte de esta radiación y la transforman en una señal electrónica. Tienen como ventajas su bajo costo, bajo peso, bajo consumo y una buena respuesta espectral.

El ensayo de IRT proporciona información acerca del perfil térmico y la ubicación física exacta de defectos en celdas y paneles solares, información que puede utilizarse además para diagnósticos cuantitativos. En general, los defectos como grietas, microfracturas o soldaduras deficientes pueden provocar un aumento de la resistencia local, lo que a su vez puede provocar un calentamiento localizado debido al efecto Joule. Un defecto que comúnmente lleva al calentamiento localizado es el *shunt*. Por otra parte, si se ve afectada la absorción o reflexión de la luz dentro de la celda, esto también podría llevar al calentamiento localizado en esa región.

El ensayo puede realizarse a oscuras o bajo iluminación. A oscuras, se requiere la aplicación de una tensión en polarización directa a la celda, tal como en el caso del ensayo de electroluminiscencia. El esquema básico para el ensayo es análogo al del ensayo de electroluminiscencia, mostrado en la Figura 2.10, pero con la cámara infrarroja reemplazando la cámara CCD.

La realización del ensayo de IRT en conjunto con el ensayo de EL se ha demostrado muy beneficiosa para la identificación de la mayor cantidad de defectos posible. Mediciones complementarias de EL e IRT han demostrado que, por un lado, no todos los defectos identificados en una imagen EL llevan a un aumento en la temperatura local de la celda y, por otro lado, celdas con imágenes EL sin defectos notables pueden producir imágenes IR con áreas calientes, relacionadas a altas pérdidas de potencia. La Figura 2.15 muestra imágenes de EL e IRT del mismo módulo, señalando en blanco una celda defectuosa (zona oscura) que genera una región caliente en la imagen térmica (zona amarilla) [10].

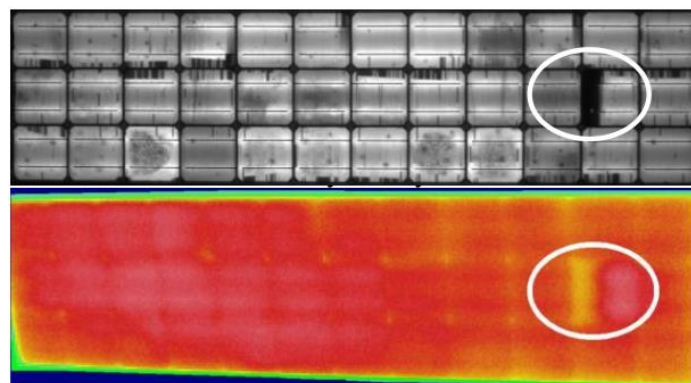


Figura 2.15: Imágenes EL (superior) e IRT (inferior) de un mismo modulo solar con varios defectos.

### 3 Metodología y Desarrollo

Este capítulo trata la metodología utilizada para la medición y obtención de datos e imágenes de electroluminiscencia y térmicas. El desarrollo incluye el sistema óptico y de excitación, y el procesamiento de los datos mediante programas computacionales.

#### 3.1 Descripción general del sistema

La descripción general del sistema se muestra en la Figura 3.1. Esta configuración permite obtener la intensidad de la señal EL emitida por la celda o módulo en cada posición  $r = (x, y)$  en una imagen mediante una cámara CCD.

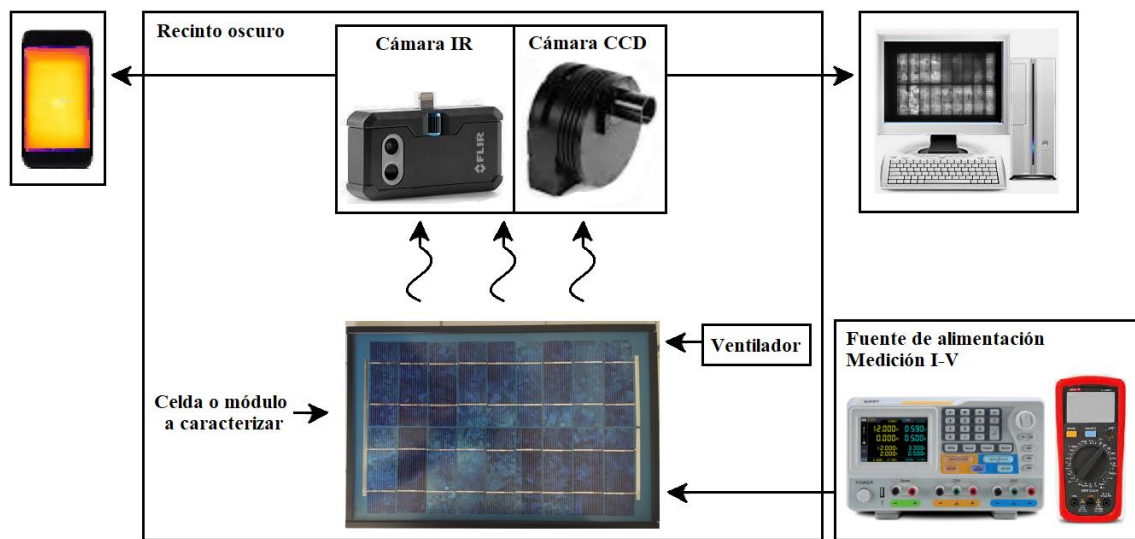


Figura 3.1: Esquema general del sistema de medición implementado.

La celda o módulo a caracterizar se coloca sobre un porta muestras de manera de quedar alineada con la cámara, a una distancia mínima para que se pueda capturar el área completa de la celda o módulo. La lente seleccionada determina la distancia mínima y el área capturada por el sensor. Se utiliza un sensor CCD para capturar imágenes de EL y un detector micro-bolómetro para capturar imágenes térmicas.

Tanto la muestra como el sensor se encuentran ubicados en un receptáculo que permanece a oscuras durante la medición. Esto evita que la luz ambiente interfiera en las imágenes, permitiendo que el sensor capture únicamente la luz emitida por la muestra.

Para mantener la temperatura durante la medición, se utiliza un ventilador ubicado dentro del receptáculo, conectado a una fuente de alimentación de continua. Se realizan registros

de la temperatura de la muestra durante todo el proceso de medición. Las imágenes térmicas se obtienen con una cámara FLIR acoplada y operada desde un teléfono móvil.

La muestra se polariza en directa mediante una fuente de alimentación de continua. Se realizan mediciones de cuatro terminales, registrando los datos de corriente y tensión mediante un multímetro. El sistema de la cámara CCD y la fuente de alimentación se opera desde una computadora, mientras que la cámara térmica se opera acoplada a un teléfono móvil, operada mediante una aplicación móvil.

### 3.2 Descripción de los sensores

La emisión de la señal EL se detectó mediante una cámara ST-7 Dual SBIG con un sensor CCD de resolución de 765x510 píxeles. El CCD, o dispositivo de carga acoplada, consiste en un conjunto de electrodos o compuertas ordenadas en filas y columnas, que componen los píxeles de la imagen a capturar. Los fotones emitidos por la celda solar se colectan en los píxeles del CCD, generando una carga eléctrica móvil que se transfiere a un amplificador.

La Figura 3.2 muestra la estructura básica del sensor y sus píxeles [11].

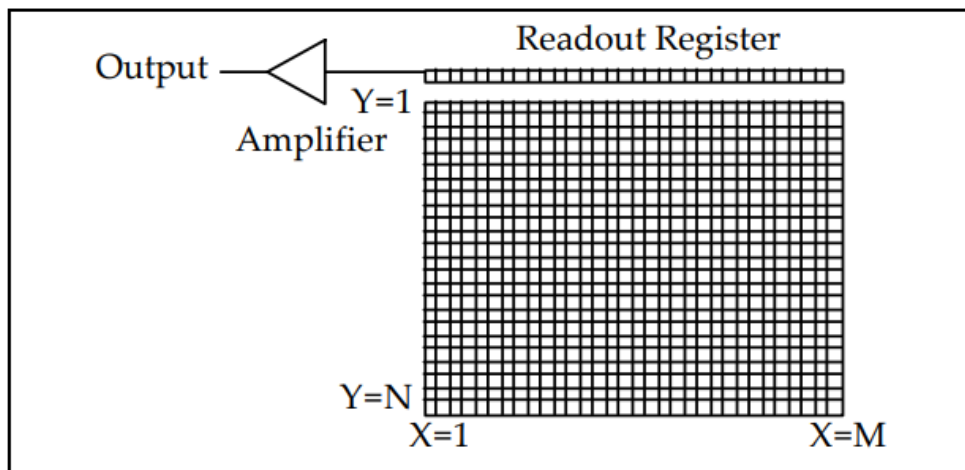


Figura 3.2: Estructura básica del sensor CCD.

La transferencia se logra manipulando la tensión en las compuertas de forma que las cargas se muevan de pixel a pixel de forma vertical y luego horizontal en serie pasando por el amplificador. Finalmente, la detección de la carga se logra al convertir las cargas de cada píxel en tensiones de salida. La tensión de salida es la que se transforma en intensidad de señal, para componer las imágenes EL.

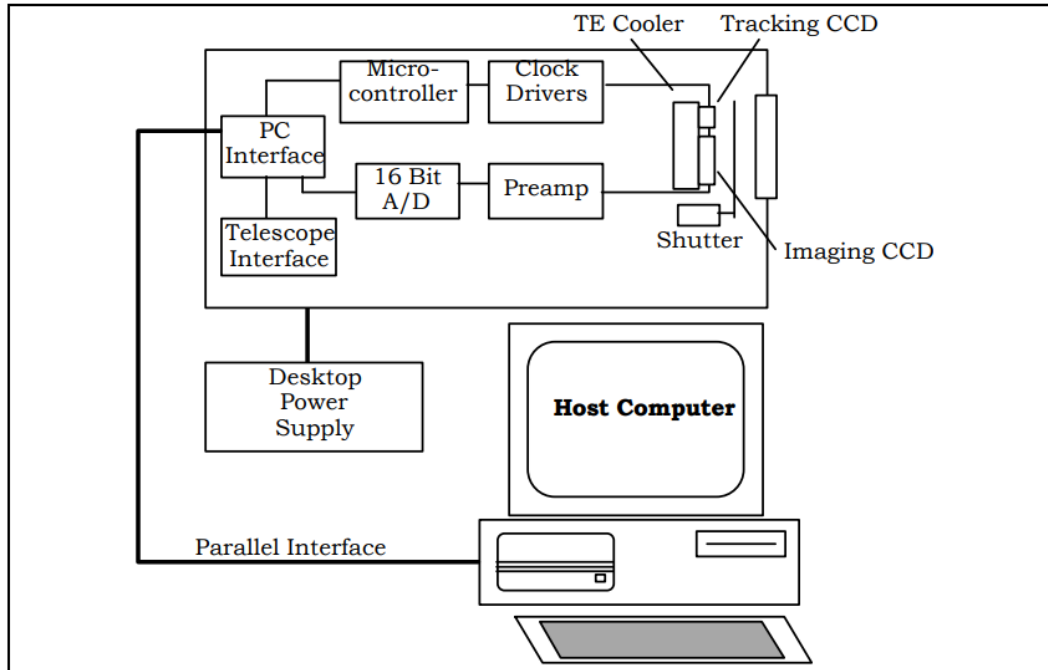


Figura 3.3: Diagrama de bloques de la cámara ST-7I, de Santa Barbara Instrument Group [11].

La Figura 3.3 muestra un esquema de bloques de las partes que componen la cámara utilizada en este trabajo. El CCD se muestra directamente al frente (parte superior derecha de la figura) del esquema, seguido por un sistema de enfriamiento termoeléctrico regulado por el microcontrolador. El ruido en las imágenes puede originarse de forma aleatoria, desde los fotones incidentes, del sistema CCD y en el proceso de lectura. El ruido oscuro se debe a vibraciones de los átomos de silicio con la temperatura, que liberan cargas que se acumulan junto con los portadores fotogenerados. Esta corriente oscura aumenta de forma lineal en el tiempo, y se reduce enfriando el material. Por lo tanto, la temperatura del sensor CCD se mantuvo en 262 K durante los ensayos.

Además del sensor CCD, otros componentes fundamentales del sistema incluyen el preamplificador, la electrónica de lectura/reloj, el microcontrolador y la fuente de alimentación. El obturador controla los tiempos de exposición y cierra durante la transferencia de cargas para evitar interferencias externas. Los bloques de electrónica de lectura/reloj componen un interfaz al CCD, obteniendo datos en forma digital para su almacenamiento en la computadora.

El proceso para obtener una imagen enfocada de la muestra depende de la configuración del sistema muestra-lente-cámara, tal como se muestra en la Figura 3.4.

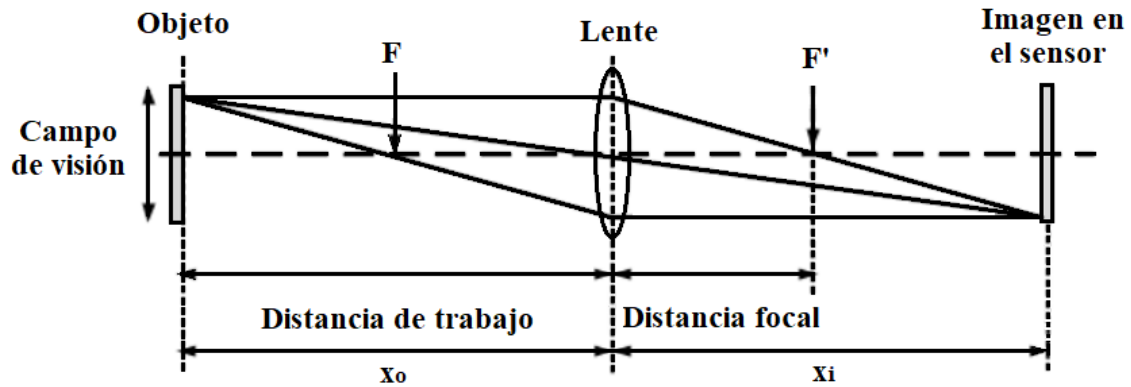


Figura 3.4: Configuración del sistema óptico utilizado.

Basado en la ley de lentes:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{x_i} + \frac{1}{x_o} \quad 3.1$$

Donde  $F$  es la distancia focal,  $x_o$  es la distancia de trabajo, y  $x_i$  es la distancia a que se forma la imagen. Se observa que una mayor distancia de trabajo requiere una menor separación entre la lente y el sensor, para una misma distancia focal. Un parámetro importante a considerar es el tamaño del sensor CCD, ya que define el campo de visión FOV, o la mayor longitud a capturar, dada por

$$F = \frac{A_S x_o}{FOV + A_S} \quad 3.2$$

Donde  $A_S$  es el ancho del sensor. El sensor utilizado fue de 6.9x4.6 mm. Estas ecuaciones son suficientes para definir la configuración del sistema óptico; tomando estas consideraciones, se utilizó una lente de distancia focal fija, de 25 mm, y una apertura de  $f/1.4$ . La distancia entre la lente y el sensor se podía variar mediante la montura utilizada con la cámara, y las distancias de trabajo se ajustaron según el tamaño de cada celda y módulo.

Otros factores importantes a tener en cuenta son el tiempo de exposición y la resolución espacial del sensor CCD. El tiempo de exposición se refiere al periodo en que se acumulan cargas fotogeneradas en cada compuerta; cada sensor tiene una capacidad máxima que puede detectarse en un píxel. Mayores tiempos de exposición permiten visualizar imágenes con intensidades de EL más bajas, pero introducen demoras indeseadas al proceso de medición y en general un mayor nivel de ruido. Se reconoce entonces un compromiso entre el tiempo de exposición empleado y la calidad de imagen que se desea obtener. Por otro lado, la resolución espacial corresponde a la dimensión mínima de



espacio que se puede capturar en un píxel, y dependerá del sensor utilizado y la ya mencionada configuración muestra-lente-cámara.

En cuanto a las imágenes térmicas, se utiliza una cámara con un sensor micro-bolómetro, sin sistema de enfriamiento, apta para operar a temperatura ambiente. El sensor emplea una característica de capa termosensible que cambia su resistencia de acuerdo a la temperatura. La Figura 3.5 muestra un diagrama de bloques del sensor, donde se muestra un elemento absorbente, un termómetro, y un circuito integrado de lectura al que se transfiere la información de la variación de resistencia para su procesamiento [12]

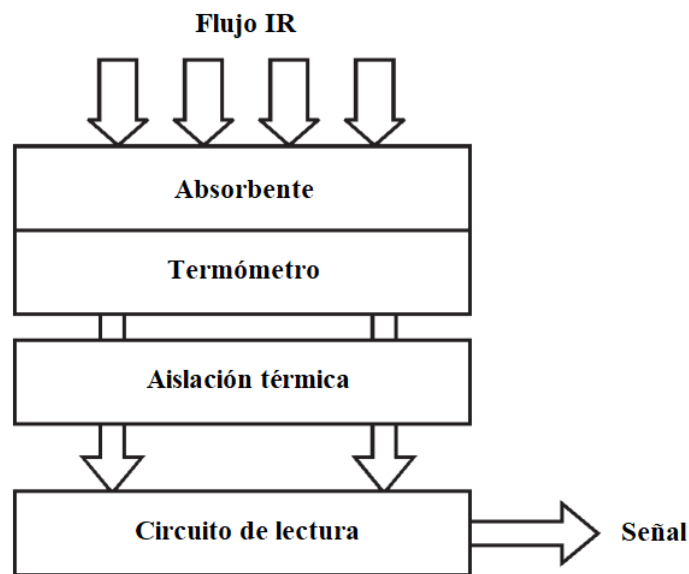


Figura 3.5: Diagrama de bloques del sensor micro bolómetro.

Para lograr una alta sensibilidad, el termómetro se mantiene aislado térmicamente del sustrato que compone el circuito de lectura. La cámara cuenta con un sensor de luz visible además del sensor infrarrojo, y una interfaz de usuario mediante una aplicación móvil, facilitando en gran medida la obtención de imágenes.

Cabe resaltar que la cámara IR no recibe solamente radiación del objeto inspeccionado, sino lógicamente también la radiación del entorno reflejada en el objeto. La emisividad, la radiación de reflexión y la absorción de la atmósfera son algunos parámetros que influyen en la medición de la temperatura del objeto. La cámara utilizada posee 1440x1080 píxeles, con una precisión de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  [13].

### 3.3 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos empezó por un ajuste de contraste y corrección por luz ambiente implementado desde el software de las cámaras en conjunto con el software de

cómputo numérico Matlab. Los cálculos adicionales, incluyendo la aplicación de métodos numéricos iterativos y la obtención de gráficos y mapas se realizaron mediante los softwares OriginPro y Matlab.

### **3.4 Desarrollo de los ensayos**

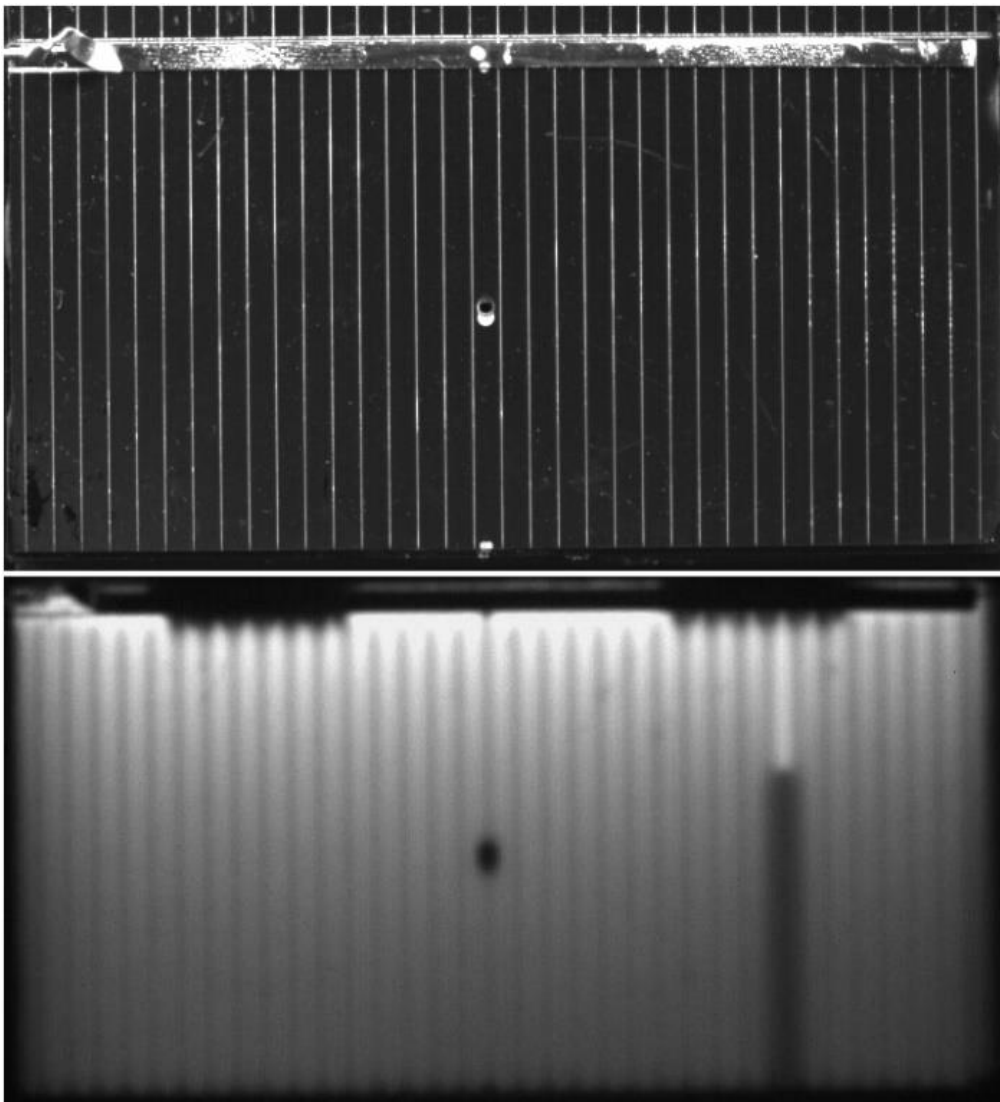
El desarrollo inició por la caracterización inicial de las muestras, mediante la obtención de las curvas de corriente-tensión iluminada y a oscuras, para la determinación de los parámetros eléctricos de salida en cada caso. Esta información se utilizó en los análisis posteriores. Los ensayos se llevaron a cabo mediante un sistema de medición constituido por una computadora, una fuente de alimentación OWON ODP6062, y un multímetro.

Para la medición bajo condiciones estándar de iluminación (correspondientes al espectro AM1.5G), se utilizó un simulador solar “Sunlight Solar Simulator Model 11002, Abet Technologies”. También se implementó en otro caso la iluminación LED, e incluso se realizaron mediciones bajo la luz solar, con resistencias variables para la obtención de los datos. Estas mediciones se realizaron el día 18 de agosto de 2022 a las 14 horas, con una irradiancia esperada de  $0.82 \text{ kW/m}^2$ .

A continuación, se procedió a la obtención de las imágenes de EL. El ensayo se llevó a cabo a oscuras, buscando una temperatura de 293 K para las muestras. La temperatura se mantuvo con la ayuda de un ventilador, y se midió empleando la cámara térmica FLIR ONE Pro durante todo el ensayo. También se midieron tensión y corriente utilizando cuatro terminales, para minimizar los errores causados por la resistencia de contacto. Si la resistencia de contacto no se tiene en cuenta, se pueden producir errores significativos en las mediciones de la corriente y la tensión.

Para la caracterización de las celdas mediante EL, se trabajó con corrientes en el rango de corriente  $I$  de  $0,1 \times |I_{SC}|$  a  $4,5 \times |I_{SC}|$ . Tanto el rango de corrientes como los tiempos de exposición se eligieron para aprovechar la variedad de los resultados obtenidos. Con relación a los niveles de polarización, se busca obtener imágenes a un amplio rango de corrientes, sin dañar las muestras. Con relación a los tiempos de exposición, se busca obtener imágenes a distintos tiempos de exposición, pero considerando que en el campo siempre se busca el menor tiempo posible, para reducir la duración necesaria de los ensayos.

El método de enfoque utilizado fue manual, obteniéndose en cada caso una primera imagen enfocada a luz ambiente, antes de proceder al ensayo. Sin embargo, es necesario reconocer que el enfoque depende de la longitud de onda de la luz emitida, y en el caso del silicio la emisión ocurre en el rango del infrarrojo, por lo que se enfocará en un punto distinto al de la luz visible [16]. La Figura 3.6 muestra este efecto sobre la imagen de EL tomada luego de lograr el primer enfoque a luz ambiente, resultando ligeramente fuera de foco. Pese a esto, se buscó ajustar el enfoque en cada caso, a fin de obtener mejores resultados.



*Figura 3.6: Efecto de la longitud de onda sobre el enfoque de una imagen.*

Una vez logrado el enfoque, y para mejorar la medición, se tomó una imagen mientras la celda no estaba polarizada. Esto es parte de un proceso de corrección para establecer el cero de la medición de EL. Esta imagen se denomina imagen de fondo, y se utiliza en

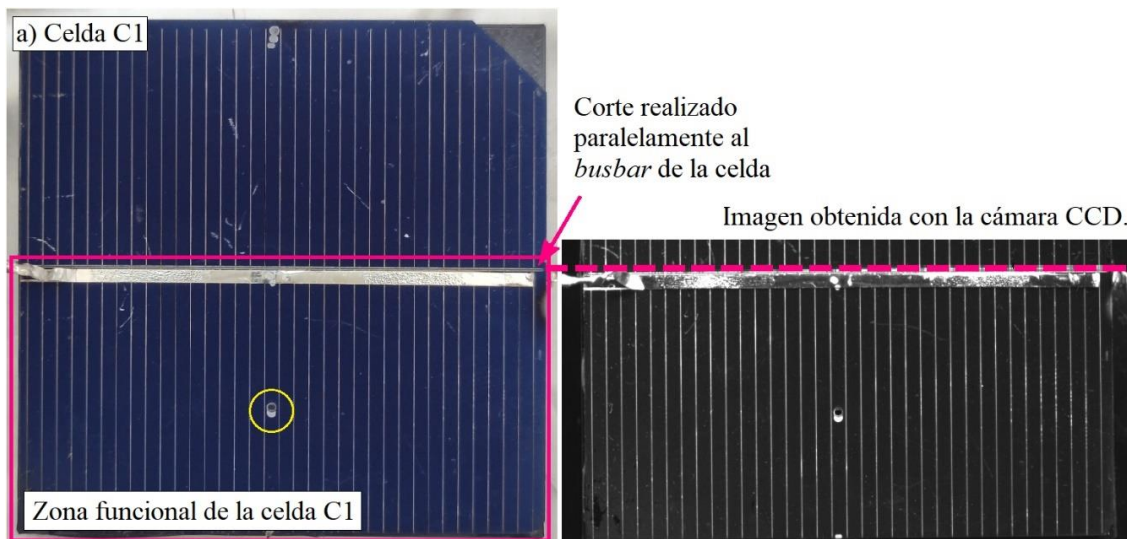
caso de que el receptáculo donde se lleva a cabo el ensayo no logre eliminar completamente las fuentes de luz ambiente indeseadas. En ese caso, esa iluminación ambiente será captada por el sensor en la imagen de fondo, que luego se utilizará para corregir las demás imágenes de EL de las celdas. También captará fuentes de ruido inherentes a la cámara. Las siguientes imágenes se tomaron con distintos niveles de polarización. La corrección consistió en restar la imagen de fondo de las demás imágenes.

## 4 Caracterización de dispositivos fotovoltaicos mediante imágenes de EL e IRT

En este capítulo se realiza la caracterización de tres celdas y un módulo solar, mediante la obtención y análisis de las curvas de corriente-tensión  $I(V)$  y de imágenes de EL e IRT, según el sistema de medición implementado. La sección 4.1 trata la caracterización de las celdas, y la sección 4.2 la caracterización del módulo, ambas incluyendo un análisis cualitativo y cuantitativo. El análisis cualitativo consiste en la observación del patrón de luminosidad y áreas de contraste presentes en las imágenes de EL, logrando una primera identificación de detalles y defectos. El análisis cuantitativo consiste en el estudio de las intensidades de EL a distintos niveles de polarización y la obtención de mapas de  $R_s$  y  $j_0$ . Se comparan las curvas de la intensidad de EL en función de la tensión y la característica corriente-tensión a oscuras. Mediante la síntesis de los resultados alcanzados en cada análisis, se extraen conclusiones y se estudia la validez de los resultados obtenidos. Para el análisis cualitativo se obtienen, adicionalmente, imágenes térmicas, que permiten verificar las condiciones de cada ensayo y la aplicabilidad de los modelos para EL.

### 4.1 Caracterización de celdas de silicio monocristalino

A continuación, se describen los ensayos realizados sobre dos celdas cuadradas de  $36\text{ cm}^2$  (designadas como C1 y C2) y una celda rectangular de  $49\text{ cm}^2$  (designada como C3), todas de silicio monocristalino, siendo C3 una celda de contactos posteriores interdigitados. Las celdas C1 y C2 se encuentran modificadas, presentando un corte adyacente a los *busbars*, de forma que solo funciona una mitad de cada celda, tal como se muestra en la Figura 4.1.



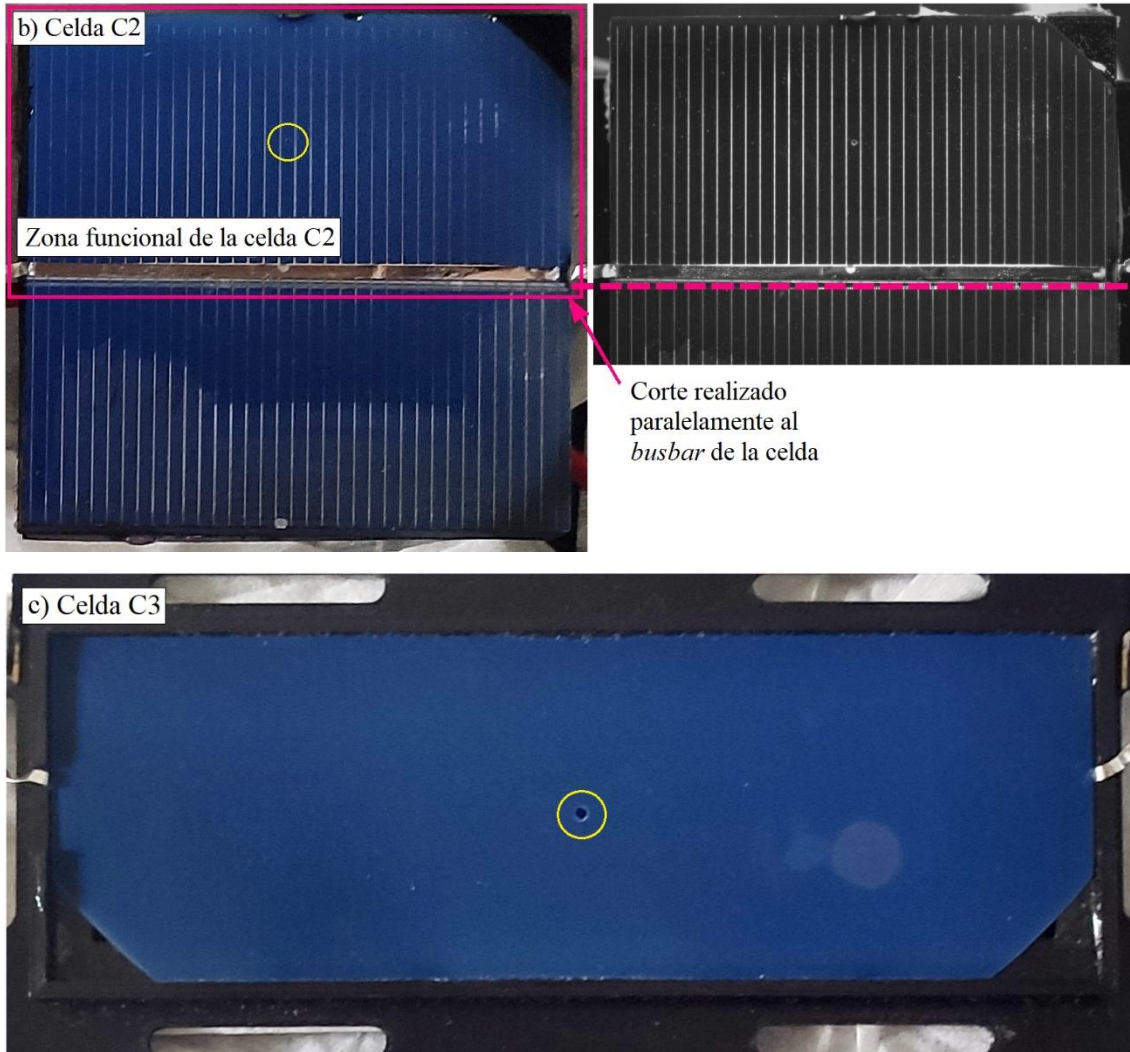


Figura 4.1: Celdas a estudiar; a) Celda C1, b) Celda C2, c) Celda C3.

Asimismo, las celdas C1, C2 y C3 tienen en cada caso una perforación circular en su centro, indicada en color amarillo en la Figura 4.1.

### Mediciones preliminares

En la Figura 4.2 se muestran las curvas corriente-tensión a oscuras y bajo iluminación, para las celdas cuadradas (partes a y b de la fig.), y la celda solar con contactos posteriores interdigitados (parte c).

De las curvas IV medidas bajo iluminación, se obtiene la tensión de circuito abierto  $V_{oc}$  y la densidad de corriente de cortocircuito  $J_{sc}$  para cada celda. Con la misma información se grafican, en la Figura 4.3, las curvas de potencia-tensión, de las cuales se determina la potencia máxima y la eficiencia para cada caso. Los resultados se resumen en la Tabla 4.1.

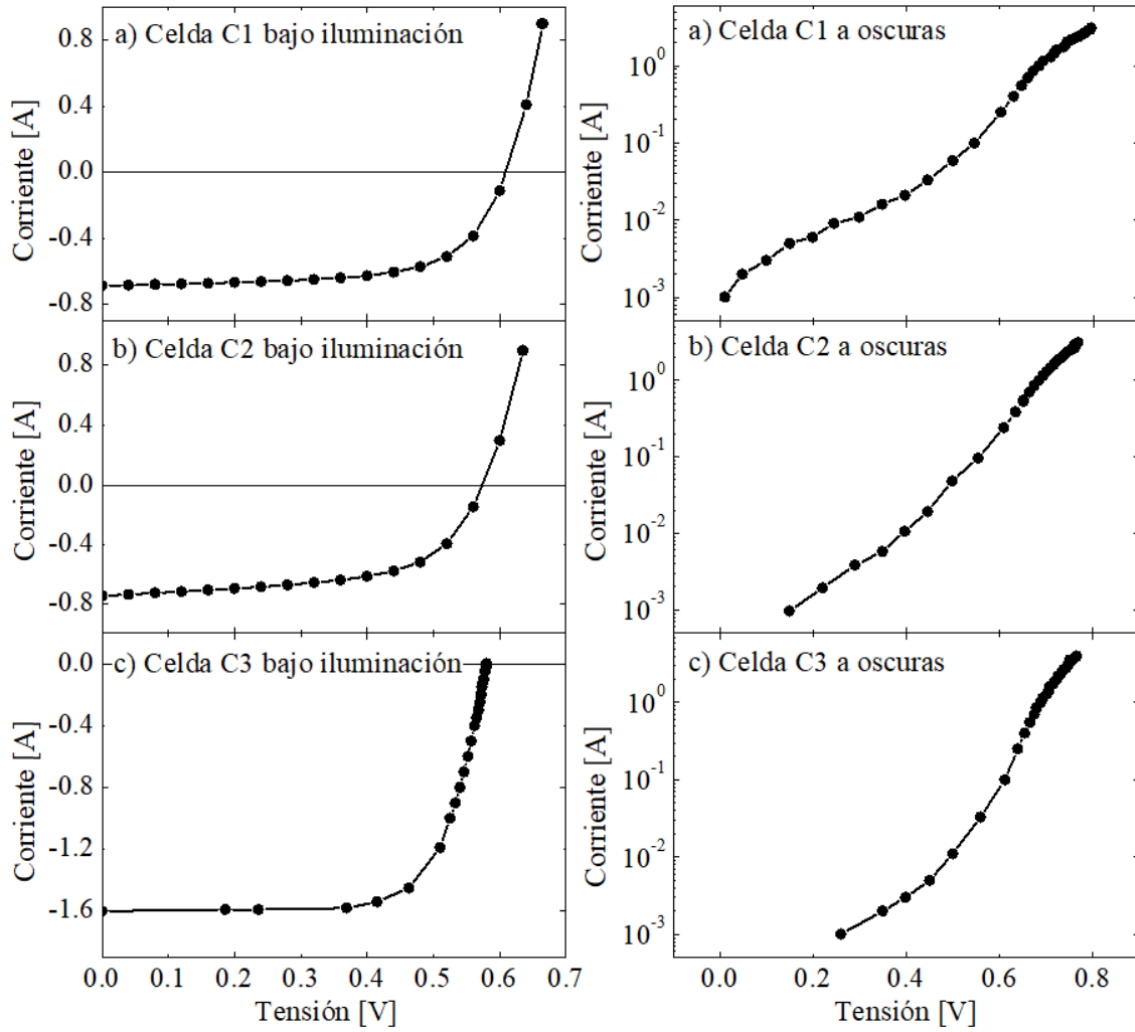


Figura 4.2: Curvas de corriente-tensión a oscuras y bajo iluminación para las celdas C1 y C2 (a y b), y C3 (c).

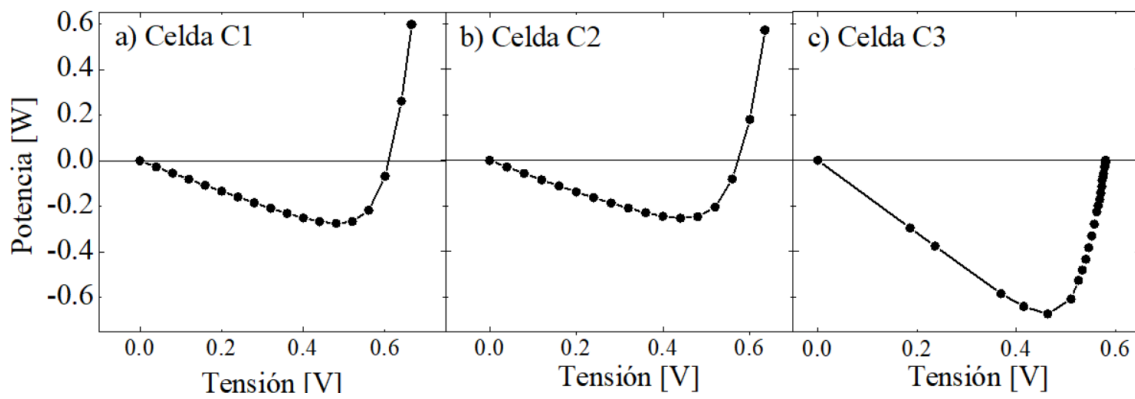


Figura 4.3: Curvas de potencia-tensión obtenidas para cada celda.

|          | Voc [V] | Jsc [mA cm <sup>-2</sup> ] | Pmax [W] | FF [%] | η [%] |
|----------|---------|----------------------------|----------|--------|-------|
| Celda C1 | 0,60    | 38,3                       | 0,27     | 66,6   | 15,3  |
| Celda C2 | 0,56    | 42,3                       | 0,27     | 66,0   | 15,7  |
| Celda C3 | 0,58    | 32,6                       | 0,67     | 72,3   | 13,7  |

Tabla 4.1: Parámetros obtenidos de las curvas IV bajo iluminación de cada celda.

A partir de las curvas IV a oscuras, se obtiene el factor de idealidad  $n_{id}$  correspondiente a este rango de corrientes, y la resistencia serie  $R_s$ . Los resultados se muestran en la Figura 4.4, obtenidas según el procedimiento descrito en la sección 2.2.

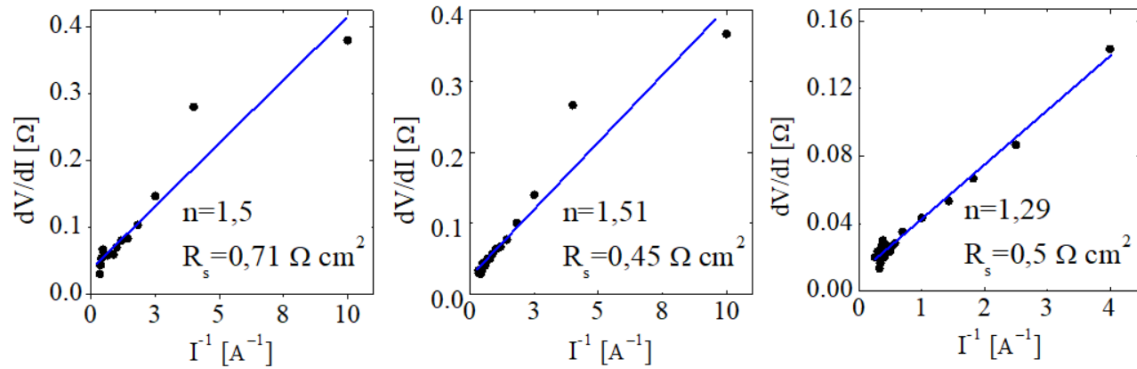


Figura 4.4: Obtención del factor de idealidad y de la resistencia serie  $R_s$  para las celdas a) C1, b) C2, c) C3.

### Imágenes de electroluminiscencia

4.1.2 Se procedió a capturar las imágenes de EL, representándose de esta forma la señal de electroluminiscencia en cada pixel de la imagen. La Figura 4.5 muestra algunas imágenes representativas que se escogieron del total para las celdas C1 y C2.

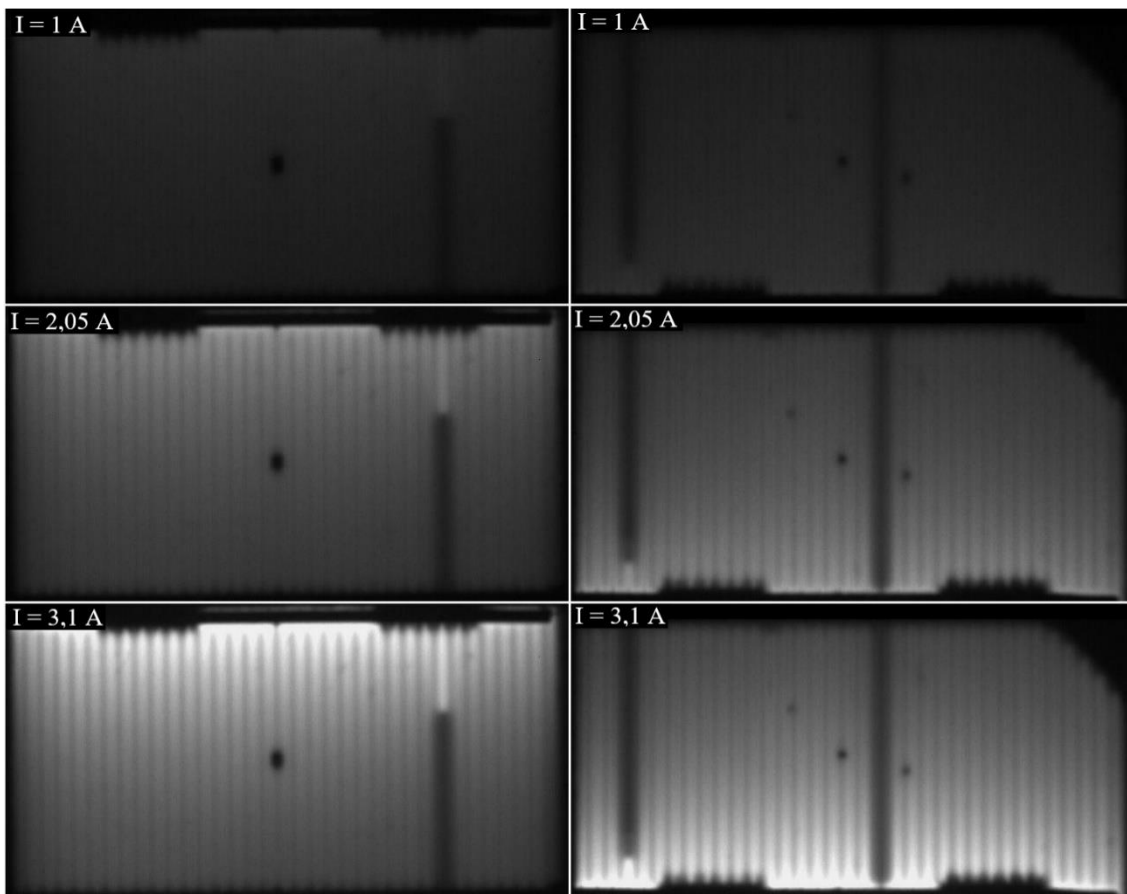


Figura 4.5: Imágenes de electroluminiscencia de las celdas C1 (izquierda) y C2 (derecha), para distintos niveles de polarización.



En el caso de las celdas C1 y C2, se tomaron 21 imágenes de EL, a niveles desde 0,1 A hasta 3,1 A. En el caso de la celda C3, se tomaron 27 imágenes, con corrientes desde 0,1 A hasta 4 A. La Figura 4.6 muestra 4 imágenes de la celda C3.

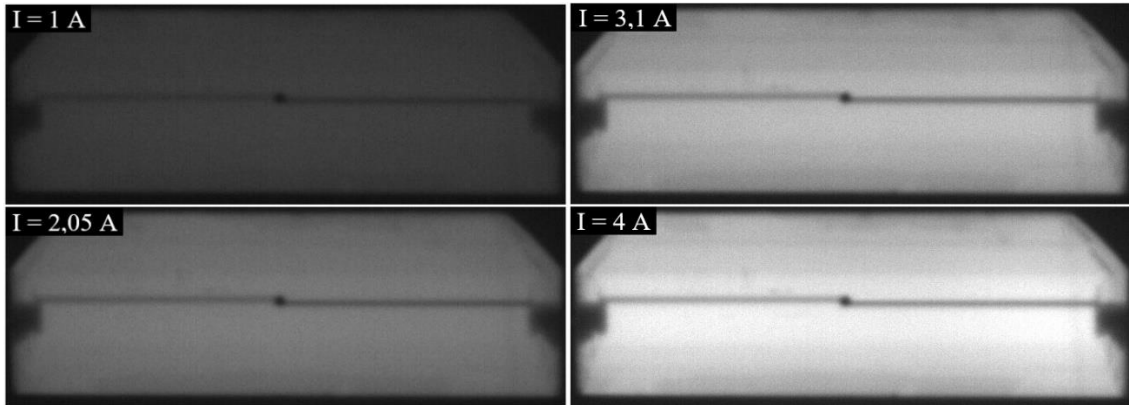


Figura 4.6: Imágenes de electroluminiscencia de la celda C3 para distintos niveles de polarización.

Un primer efecto se observó en las celdas C1 y C2, que es necesario resaltar para el entendimiento de los gráficos en este capítulo. La Figura 4.7 muestra las imágenes de C1, a 0,85 A y a 2,05 A, en la región del agujero producido en su centro. El agujero se utiliza como referencia, para mostrar la ubicación de los dedos de la celda, que se señalan con flechas en color rojo. Los dedos, así como los *busbars*, cubren la celda impidiendo la emisión, por lo que en estas regiones se espera observar una reducción de la intensidad de los píxeles. Esto se verifica para niveles de polarización más bajos, tal como se observa en la Figura 4.7 a 0,85 A. Sin embargo, a 2,05 A, las regiones más oscuras no corresponden a la zona de los dedos, si no que la zona entre dedos. Las flechas rojas en la imagen a 2,05 A también marcan la posición de los dedos.

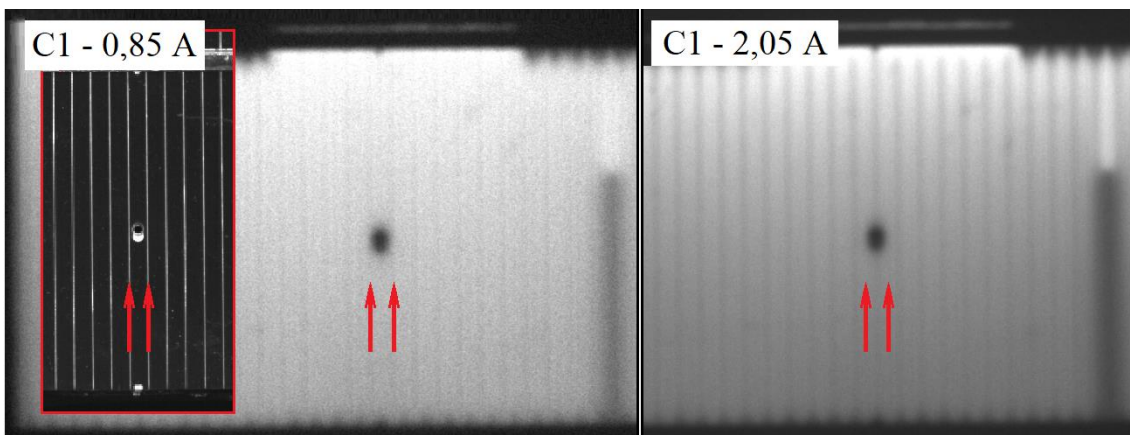


Figura 4.7: Posición de los dedos en imágenes de EL de la celda C1 a 0,85 A y a 2,05 A.

Este fenómeno merece mayor investigación, pero podría atribuirse a un efecto de desenfoque a mayores corrientes. El desenfoque en imágenes de EL se ha observado en otros trabajos, pudiendo ser consecuencia de efectos como la aberración cromática, la difracción, o la dispersión de fotones en el sensor. La variación del índice de refracción de la lente de la cámara según el rango de longitudes de onda emitidas por la celda también impacta el foco de la imagen [23]. Asimismo, se han estudiado métodos de calibración de la cámara y de corrección de imágenes para evitar estos efectos [24][25].

Considerando nuevamente las imágenes de cada celda, se puede observar la dependencia que existe entre la intensidad de la señal de electroluminiscencia y la corriente de polarización directa. Una forma de visualizarlo es mediante la gráfica de la intensidad de la señal de EL en función de las corrientes de polarización, tal como se muestra en la Figura 4.8. La gráfica se obtiene tomando un valor promedio de intensidad calculado considerando cada píxel de cada imagen. La tendencia muestra una linealidad entre ambos parámetros, con una pequeña desviación para los primeros valores de corriente. Esto ocurre debido a la baja relación señal a ruido para niveles de polarización muy bajos.

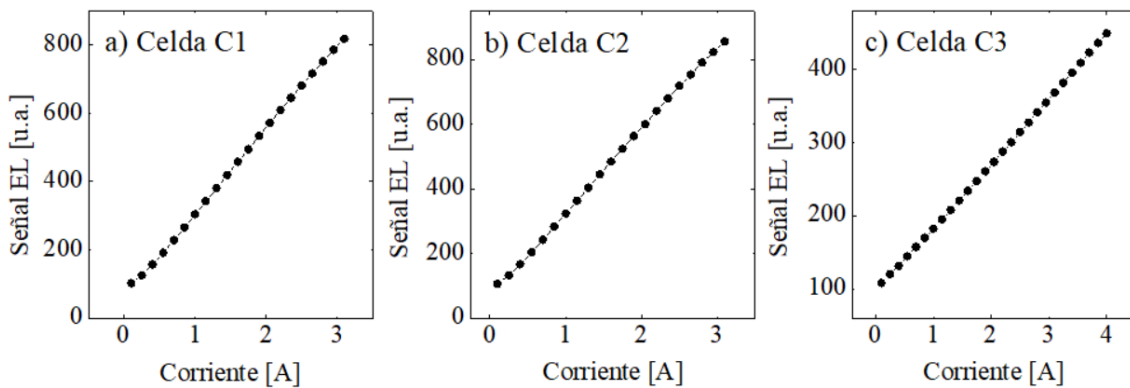


Figura 4.8: Intensidad de la señal de EL medida en función de las corrientes de polarización.

Lo mismo se puede observar mediante una comparación entre las características corriente-tensión a oscuras, en negro, y la señal EL en función de la tensión para cada elemento, en azul, como se expone en la Figura 4.9. Los resultados en las imágenes de EL se dan en unidades arbitrarias, no valores absolutos de electroluminiscencia. Para una comparación más clara, se colocan los valores a la misma escala mediante la normalización de los datos, mediante el cual se observa que valores de tensión mayores a 0,65 V, la EL y la corriente  $I$  siguen la misma dependencia con la tensión aplicada en el caso de C1 y C2. Para C3, tal correspondencia se observa para valores de tensión mayores

a 0,7 V. Esto es consistente con observaciones de Fuyuki et al. basadas en el modelo del diodo ideal [14].

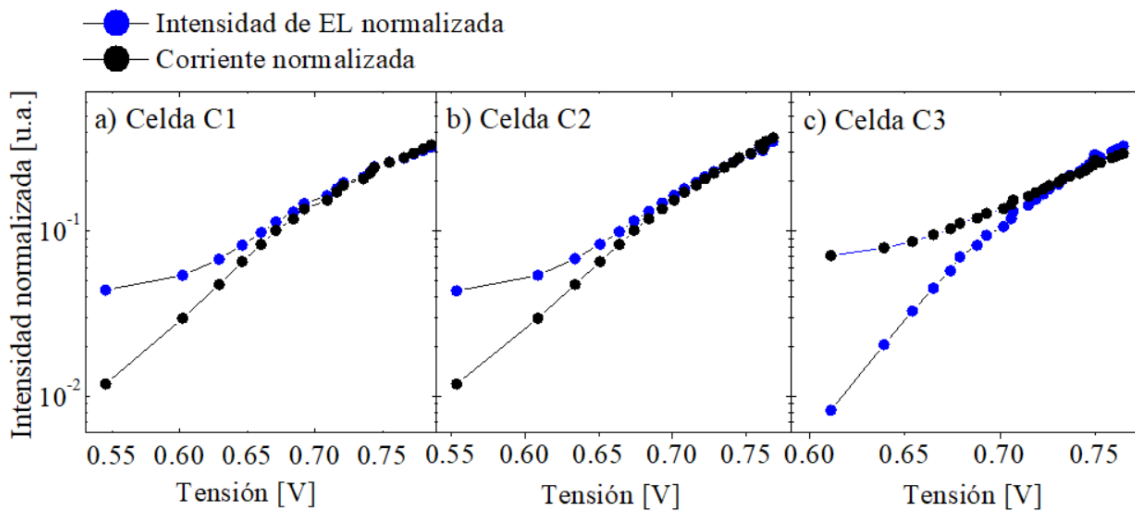


Figura 4.9: Comparativa entre corriente y señal de EL normalizadas en función de la tensión para cada celda.

### Análisis cualitativo de las imágenes de electroluminiscencia

4.1.3 Una vez obtenidas las imágenes de electroluminiscencia, se puede adquirir información sobre procesos físicos importantes que afectan el desempeño fotovoltaico de la celda, sean pérdidas ópticas, de recombinación o resistivas. Un primer análisis se basó en observar la celda y su imagen de EL y clasificar cada detalle observado en la imagen según su tamaño, forma y ubicación en la celda. Un ejemplo se muestra en las imágenes de la Figura 4.10, de las celdas C1 y C2.

En amarillo, se marcan regiones donde se observan reducciones en la intensidad de la señal de electroluminiscencia, debido a la presencia del *busbar* y las mencionadas perforaciones realizadas en cada celda. Como las imágenes mostradas se capturaron a 3,1 A, no se destacan los dedos debido al efecto mencionado anteriormente. En rojo, se señalan regiones donde la reducción de la intensidad de la señal se debe a defectos de dedos. Estos defectos se destacan fácilmente debido a su forma y extensión perpendicular a los *busbars*. Otros defectos o variaciones locales de las propiedades ópticas o electrónicas de la celda se remarcan en azul. Para cada celda, se muestra además la imagen térmica tomada para el mismo nivel de polarización.

En la celda C2, se señalan en verde dos regiones circulares con baja intensidad de la señal de electroluminiscencia. En el epígrafe 4.1.4 se analiza la posibilidad de que se traten de *shunts*. En azul, se señalan regiones de baja intensidad de la señal de EL, que también se

marcaron en la celda C1, posiblemente debido al interfaz entre el material semiconductor y el metal que compone el *busbar*.

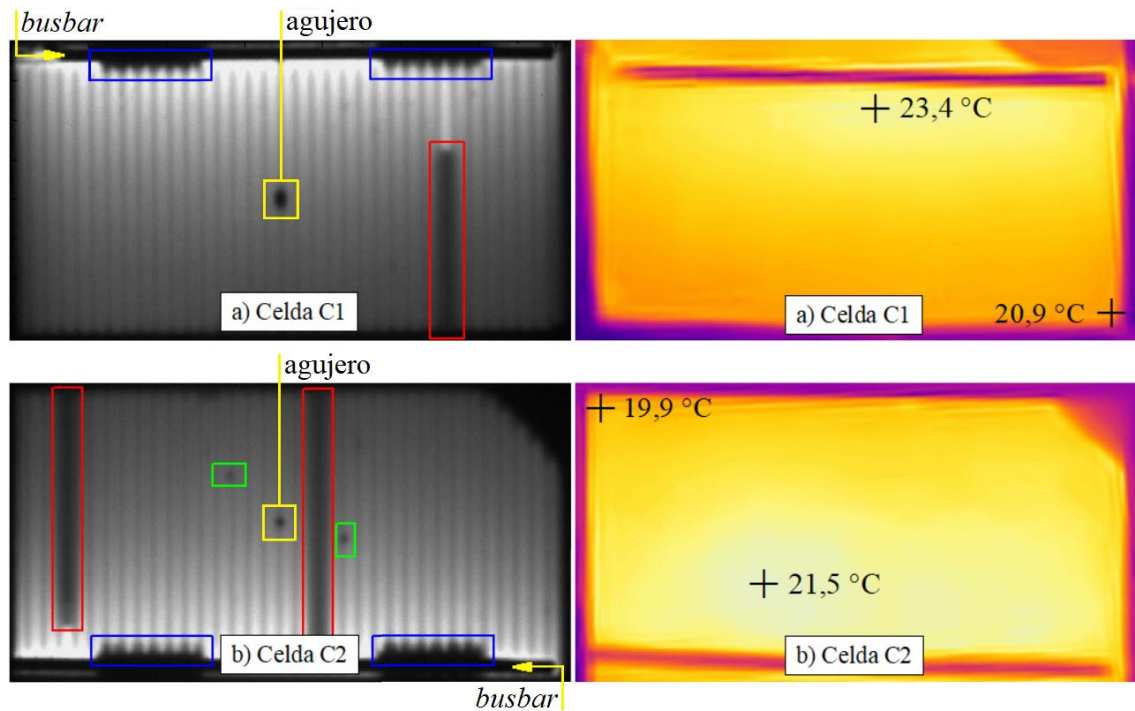


Figura 4.10: Imágenes de electroluminiscencia a 3,1 A para las celdas C1 (superior) y C2 (inferior).

La celda C3, por otro lado, no posee contactos frontales, por lo que se puede observar una imagen más homogénea en términos de la señal de electroluminiscencia. No obstante, se pueden identificar algunos detalles, señalados en amarillo y rojo en la Figura 4.11.

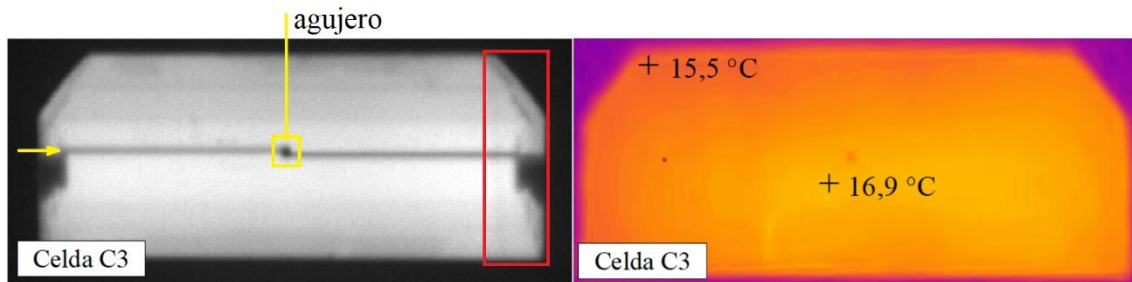


Figura 4.11: Imagen de electroluminiscencia a 4 A para la celda C3.

Como se observa en la imagen, los detalles en rojo ocurren en ambos extremos de la celda, de forma simétrica, razón por la cual se atribuye su origen al diseño de los contactos posteriores de la celda. Asimismo, en la imagen puede apreciarse como el agujero se encuentra en la región cruzada por la línea oscura marcada en amarillo. Esto indica que el agujero realizado en esta posición de la celda puede ser la causa de la inactividad en la región de la línea horizontal. Estos detalles se estudiaron con mayor profundidad en el apartado 4.1.4.

La máxima variación de temperatura observada en las imágenes térmicas, dentro del área de cada celda, fue de 2,5 K para la celda C1, y aproximadamente 1,5 K para las celdas C2 y C3. Se encuentran temperaturas ligeramente menores en regiones más alejadas del *busbar* en el caso de las celdas C1 y C2. No se observa la existencia de puntos calientes relacionados a los defectos y variaciones locales mencionados en este capítulo.

#### Análisis cuantitativo de los datos

Mediante distintas herramientas computacionales, se procedió al análisis cuantitativo de la información obtenida de las imágenes de EL. En primera instancia, se puede observar en la Figura 4.12 los perfiles vertical y horizontal a lo largo de las líneas azules y rojas para la celda C1. Los perfiles en azul atraviesan zonas sanas de la celda, mientras que los perfiles rojos atraviesan la zona del defecto de dedo. El perfil horizontal azul muestra máximos y mínimos regulares a lo largo de toda la celda, comportamiento correspondiente a la presencia de la grilla de contactos. El perfil vertical muestra una reducción gradual de la señal de EL para puntos cada vez más alejados al *busbar*, debido al efecto de la resistencia serie local. Estos perfiles sirven como referencia para la comparación con los perfiles rojos.

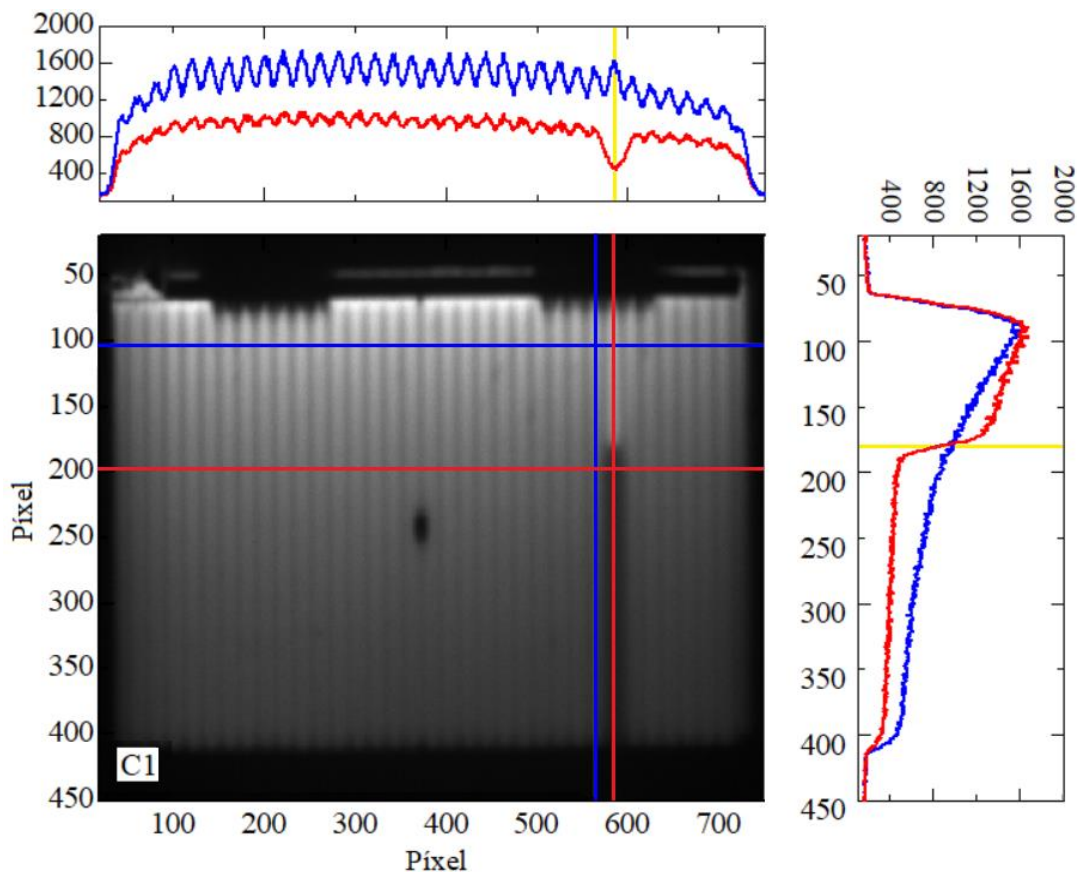


Figura 4.12: Perfiles vertical y horizontal de la señal de EL para la celda C1, a lo largo de las líneas azules y rojas.

En primer lugar, el perfil rojo vertical muestra una reducción de aproximadamente 850 unidades debido a la interrupción del dedo (cuya posición se indica con líneas amarillas en las gráficas). Este valor corresponde a la mitad de la máxima emisión de EL detectada en el perfil vertical. Por otra parte, en el perfil horizontal también es notable la reducción de la emisión de EL en esa región, pero además es posible observar el efecto de la resistencia serie local de forma generalizada en todo el perfil. Este efecto resistivo desplaza todo el perfil horizontal rojo a valores más bajos de emisión de EL; el perfil azul alcanza valores pico de hasta 1700 unidades, mientras que el azul alcanza valores de hasta 1000 unidades.

De igual manera, la celda C2 es particularmente interesante por los distintos detalles identificados, que también se estudiaron de forma cuantitativa. La Figura 4.13 presenta los perfiles horizontales de la señal de EL a lo largo de las líneas amarillas para la celda C2.

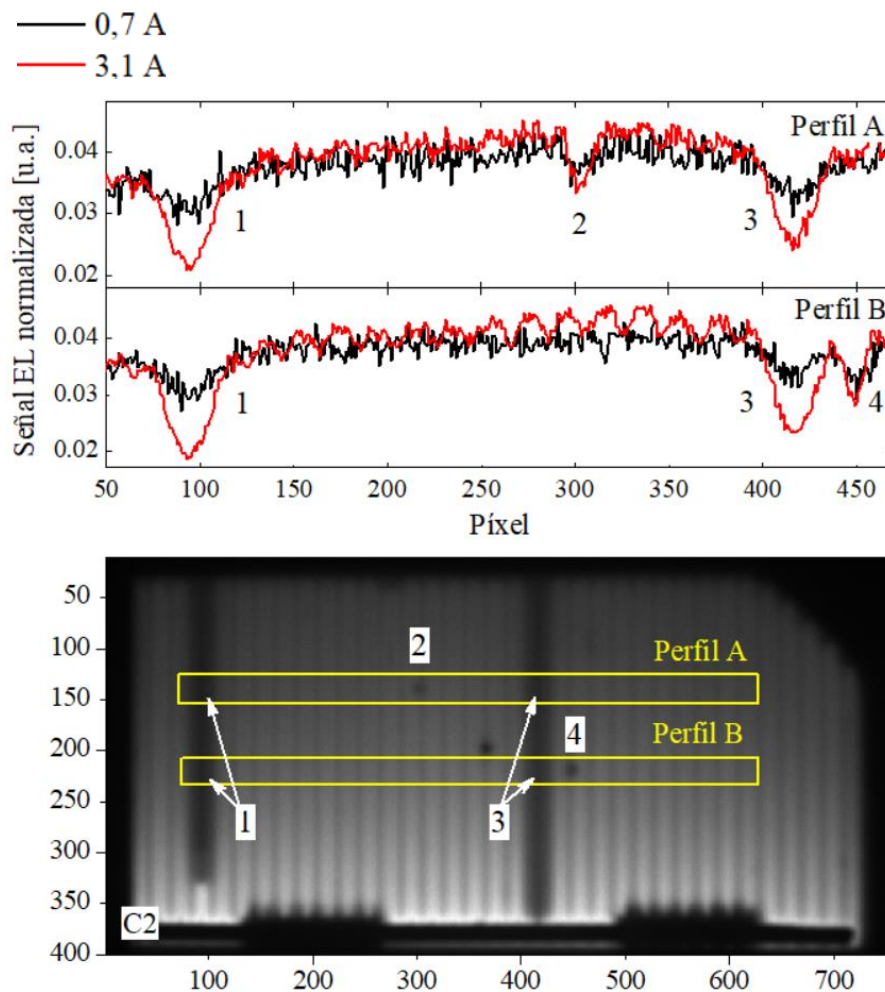


Figura 4.13: Perfiles horizontales (a lo largo de las líneas amarillas) de la señal de EL para la celda C2. Se destacan los defectos observados en la imagen: (1) y (3), interrupciones de dedos, y posibles shunts (2) y (4).

Se destacan los defectos observados en la imagen con números (1) y (3) para las interrupciones de dedos, y posibles *shunts* con números (2) y (4). Para evaluar la posibilidad de que los detalles (2) y (4) sean debido a la presencia de *shunts* locales, se compararon los perfiles a distintos niveles de polarización. Para esto, se colocan los perfiles a una misma escala mediante la normalización de los datos, solapando los perfiles de distintas corrientes de polarización en un mismo gráfico.

En los perfiles horizontales a 3,1 A (mostrados en color rojo), se observan claramente las reducciones en la emisión de EL debido a los defectos estudiados. En cambio, en los perfiles a 0,7 A (mostrados en color negro), la reducción de la señal de EL debido al efecto resistivo de las interrupciones de dedos es considerablemente menor, tal como es esperado según visto en el capítulo 2. Diferente es el caso de (2) y (4), donde la reducción de la señal de EL no es muy distinta a la correspondiente en el perfil rojo. Si bien es necesario un estudio más detallado para determinar con exactitud el origen de los contrastes observados, los resultados de la Figura 4.13 e incluso de los mapas de la celda C2 mostrados a continuación son consistentes con los observados en trabajos anteriores sobre la detección de *shunts* mediante imágenes de EL [18][21][22].

También con el uso de dos imágenes a distintos niveles de polarización, se obtuvieron mapas del valor local de  $R_S$  y  $j_0$  para cada celda, logrando mediante los mismos la discriminación de los efectos resistivos y de recombinación, por un lado, y de los efectos ópticos, por otro lado. Según se expone en el capítulo 2.3, esto es posible debido a la dependencia que tienen tales parámetros con la tensión. En otras palabras, la variación local de tensión proporciona la información necesaria para obtener mapas de  $R_S$  y  $j_0$ .

Para la obtención de los mapas de  $R_S$  y  $j_0$ , se utilizó el método iterativo de Dost et al, expuesto en el apartado 2.3 [7]. Para determinar el factor  $C_i$  para cada píxel, se requiere una imagen de EL a baja tensión. Como ya se demostró, en estas condiciones las pérdidas resistivas son despreciables, y se puede asumir una variación lateral de tensión pequeña.

Los mapas de  $R_S$  y  $j_0$  de la celda C1 se muestran en la Figura 4.18. Como se discutió en el capítulo 2, cada punto de los mapas de  $R_S$  contiene información de los efectos resistivos y cada punto de los mapas de  $j_0$  contiene información de la recombinación. Las regiones donde se manifiestan efectos resistivos se traducen en mayores intensidades en la imagen de  $R_S$ , mientras que efectos de recombinación se traducen en mayores intensidades en la imagen de  $j_0$ .

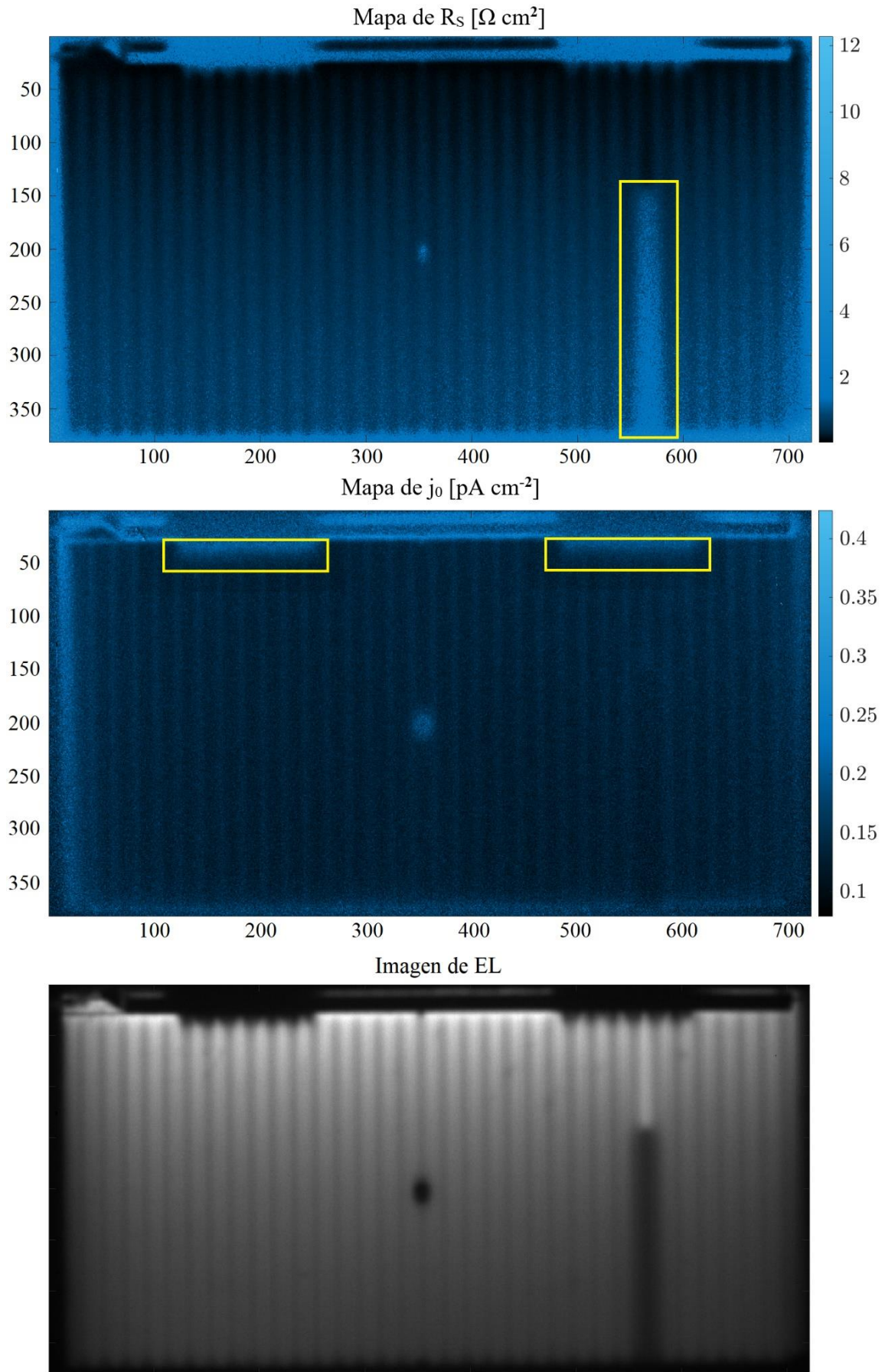


Figura 4.14: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$  calculados para CI.



En los mapas de la celda C1 los efectos más notables son un defecto de dedos y dos zonas de mayor recombinación adyacentes al *busbar*, indicativas de una afectación al material en la conexión del *busbar* con el semiconductor. Estos efectos se señalan en amarillo en los mapas de la Figura 4.14.

Los perfiles de la Figura 4.15 muestran de manera detallada el comportamiento de  $R_s$ , y  $j_0$  entre los dedos de la celda. La posición de los dedos se marca en color amarillo en los perfiles y en la imagen de EL. Según los perfiles, los valores de  $j_0$  alcanzan máximos locales para pixeles correspondientes a los dedos de la celda. Esto reside en el hecho de que el modelo, al evaluar la emisión de la celda, no es válido en zonas desde donde no se emite luz (como en los dedos y *busbars*), arrojando un valor incorrecto. El perfil también muestra mínimos locales de  $R_s$  para pixeles correspondientes a los dedos, y en las regiones entre dos dedos, se observa un aumento en la resistencia serie debido a que la trayectoria resistiva vista por la corriente es mayor.

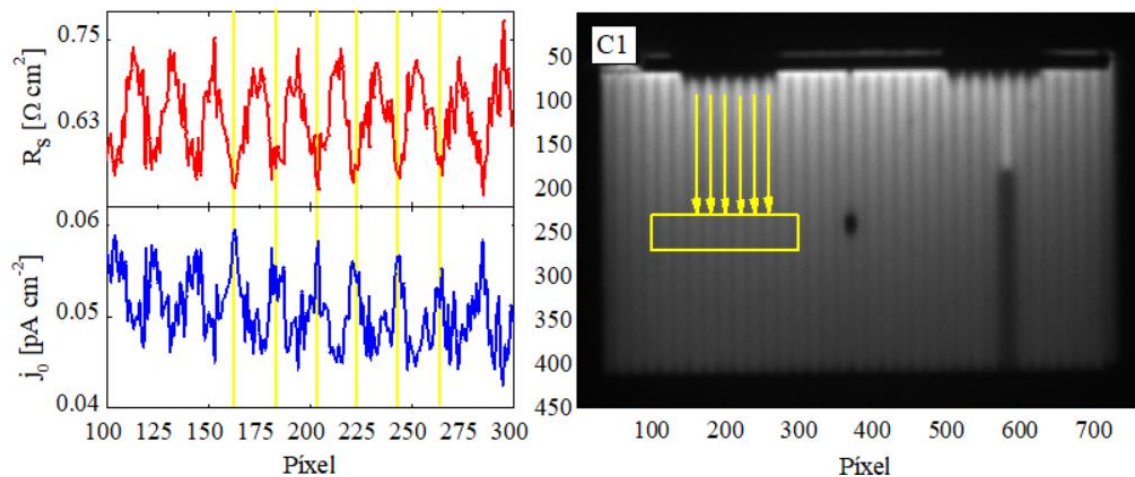


Figura 4.15: Perfil de  $R_s$  y  $j_0$  para la celda C1 a lo largo de la región destacada en amarillo.

Se utiliza ahora la celda C2 para discutir el concepto de la discriminación de los efectos resistivos de los de recombinación en los mapas de  $R_s$  y  $j_0$ . Según el autor de la ref. [7], se obtuvieron mejoras respecto a métodos anteriores, pero señala que tal separación de efectos no es perfecta. Como ejemplo podemos observar la Figura 4.16, que muestra los mapas de  $R_s$  y  $j_0$  para la celda C2. En los mapas de C2 se señala con flechas rojas dos interrupciones de dedos que llevan a un aumento esperado en el mapa de  $R_s$ . En el mapa de  $j_0$ , sólo se observa un leve contraste también señalado en rojo. Las regiones señaladas en amarillo también presentan contrastes en ambos mapas, aunque se aprecian de manera más pronunciada en el mapa de  $j_0$ .

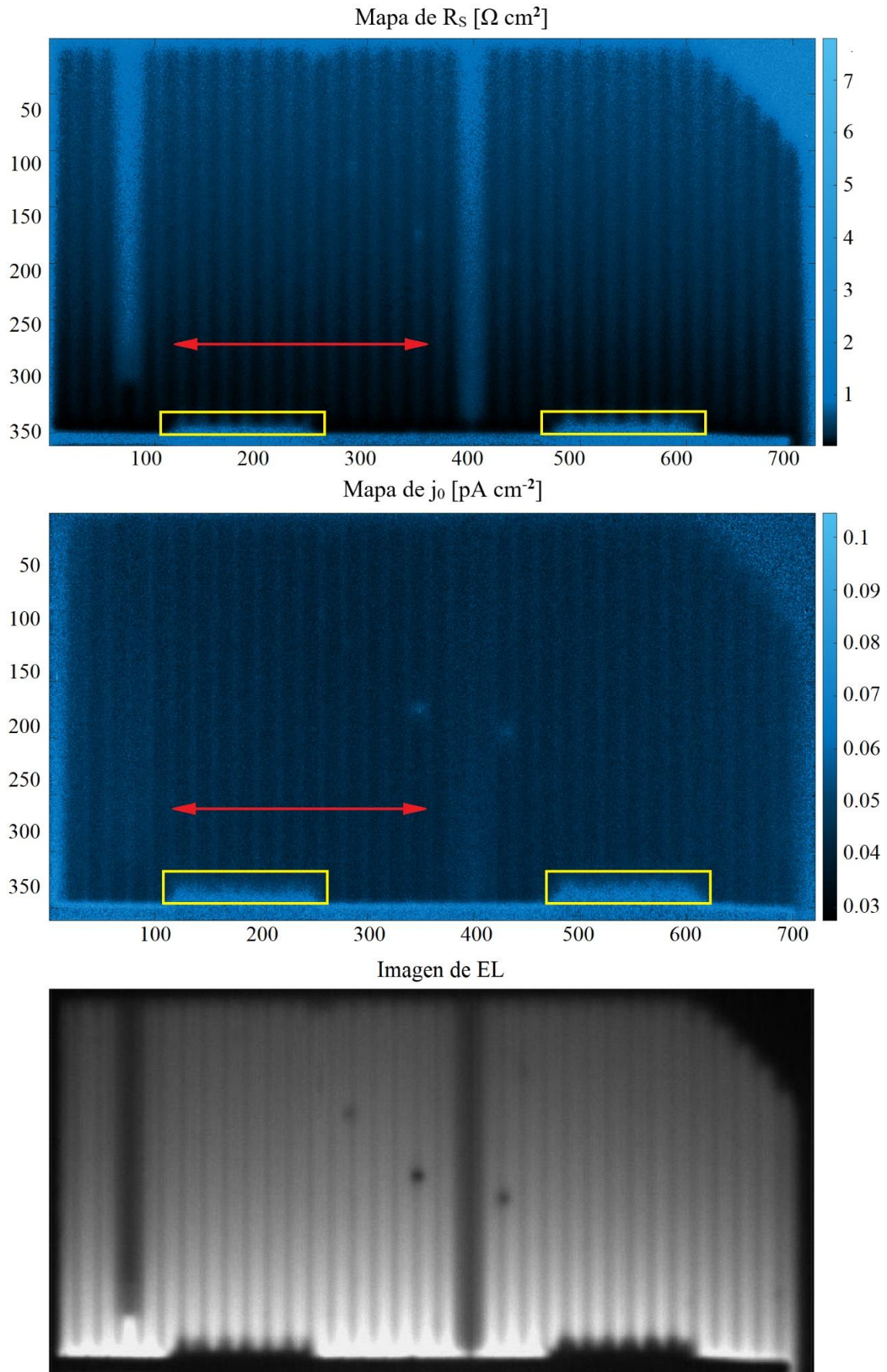


Figura 4.16: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$  calculados para C2.

Otro aspecto a estudiar en los mapas, fue la severidad del efecto de la interrupción de dedos en la celda C2. La celda presenta una interrupción a cierta distancia del *busbar*, del lado izquierdo, y otra prácticamente junto al *busbar*. En la Figura 4.17, se señalan en azul y rojo, respectivamente. Los perfiles muestran una comparación entre los valores de  $R_s$  y  $j_0$  para los defectos y para una región sin defecto de dedos.

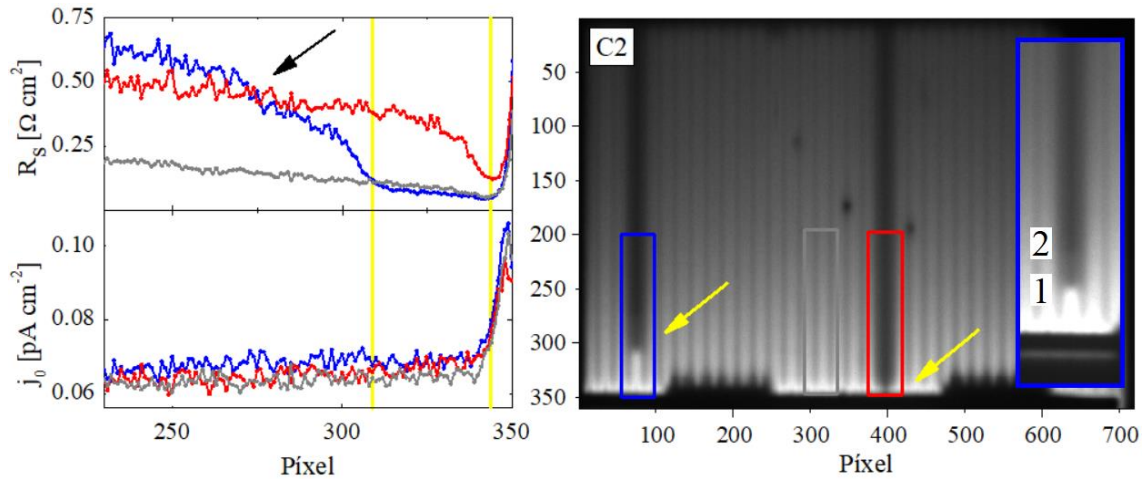


Figura 4.17: Perfiles de  $R_s$  y  $j_0$  para la celda C2 a lo largo de las regiones destacadas en azul, en rojo y en gris.

Considerando solamente la posición de la interrupción del dedo en relación al *busbar* en cada caso, se espera que el impacto en el perfil rojo sea mayor que en el perfil azul. Sin embargo, sucede exactamente lo opuesto. Se concluyó que es más severo el efecto del defecto marcado en azul, para el cual los valores de  $R_s$  aumentan en mayor medida que los del perfil azul. Aunque las gráficas muestran solamente el perfil a partir del pixel 230, se comprobó que los valores crecen aún más por encima de los valores del perfil rojo.

Un estudio más cuidadoso de la imagen de EL y los perfiles de la Figura 4.17 permitió detectar que la interrupción del dedo marcada en azul ocurre en dos partes, aumentando así el impacto de este defecto sobre la celda. La imagen ampliada de la interrupción distingue cada parte del defecto con los números (1) y (2), y en el perfil se señala con una flecha negra la región donde el mayor crecimiento en  $R_s$  lleva a un mayor impacto comparado al perfil rojo.

La segunda parte del defecto es difícil de identificar a primera vista en un análisis meramente cualitativo, lo que resalta la importancia no solamente de realizar estudios comprensivos sobre las imágenes de EL para obtener resultados confiables, sino que también la pluralidad de las causas y efectos detrás de las áreas de contraste identificadas en cada imagen.

La Figura 4.18 muestra los mapas de  $R_s$  y  $j_0$  calculados para C3.

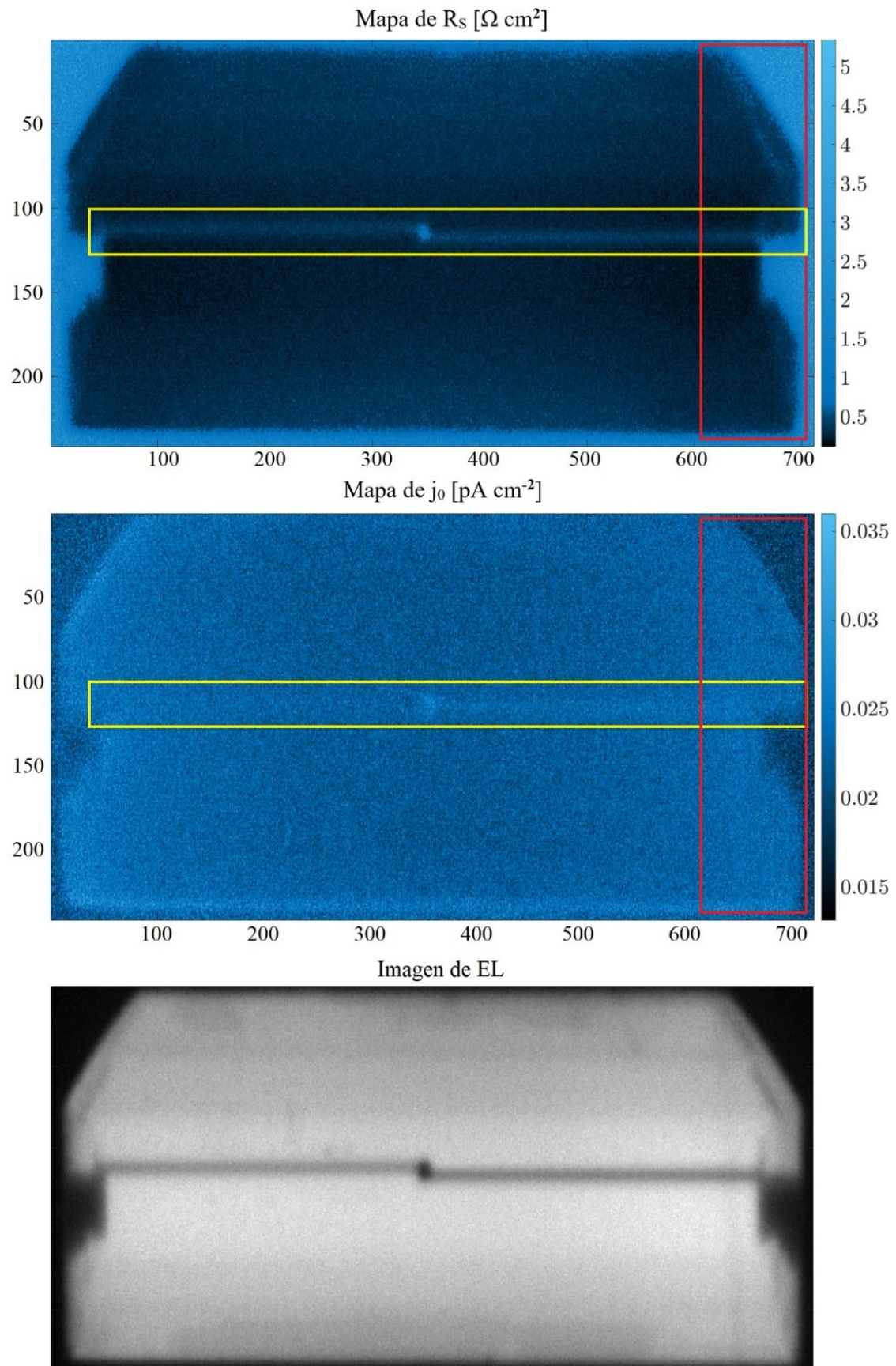


Figura 4.18: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$  calculados para C3.

De los mapas de la celda C3, se observa una gran homogeneidad de  $j_0$ , y se comprueba en los perfiles de la Figura 4.19 que los detalles en amarillo y en rojo se deben a efectos resistivos. Para esto se tomaron perfiles a lo largo de la zona marcada en rojo, que cruza los detalles a investigar, y a lo largo de la zona marcada en gris, que solo se ve afectada por el detalle horizontal señalado por la flecha verde.

El perfil rojo muestra valores de resistencia superiores en comparación con el perfil gris, en la región del rectángulo amarillo marcado con el número (2). Asimismo, se identifica una zona de alta resistencia identificada con el número (1) en el extremo derecho de la celda, y que también ocurre en su extremo izquierdo en un patrón simétrico respecto al eje vertical. En ambos perfiles se observa un aumento en los valores de  $R_s$  en la región de la línea horizontal señalada con la flecha verde.

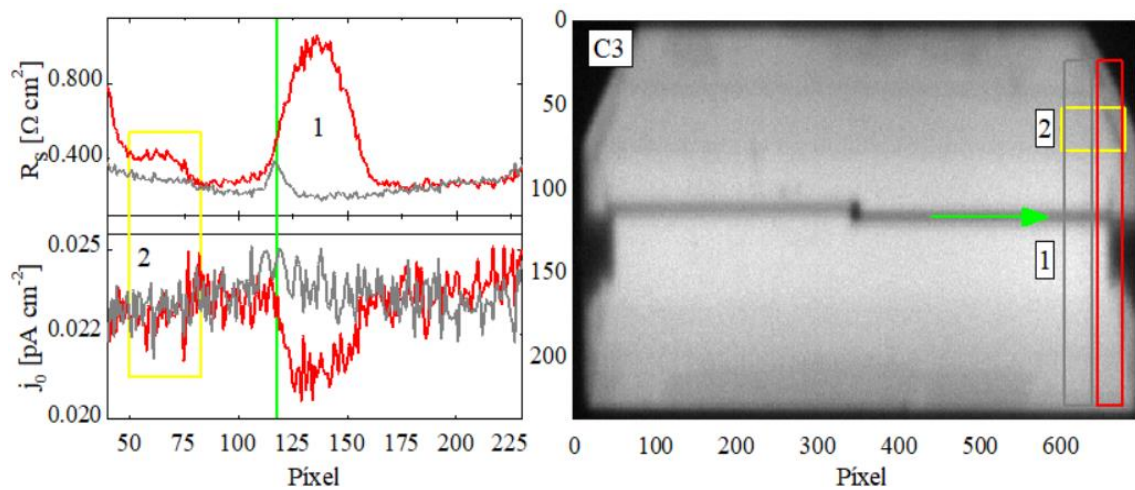


Figura 4.19: Perfiles de  $R_s$  y  $j_0$  para la celda C3 a lo largo de las regiones destacadas en rojo y gris.

Tal como se había mencionado en los análisis anteriores, una inspección de la grilla de contactos posteriores de esta celda permite comprobar la causa de los elevados valores de  $R_s$  observados. En la Figura 4.20, el diseño de la grilla posee en estas regiones un mayor espacio entre los contactos, haciendo que la resistencia al paso de corriente a estas regiones sea mayor, y generando las manchas oscuras correspondientes en el mapa de  $R_s$ . Por otro lado, se puede visualizar que el agujero realizado en el centro de la celda corta tres veces la grilla de contactos, llevando a la inactividad observada en la línea horizontal del mapa de  $R_s$  la imagen de EL.

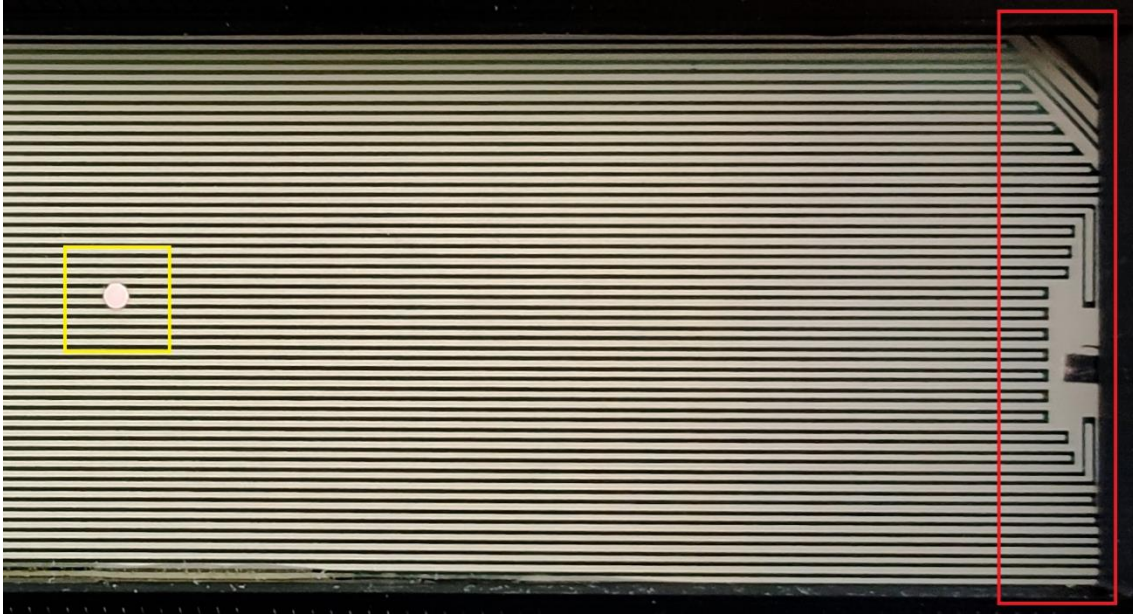


Figura 4.20: Detalles de la grilla de contactos posterior de la celda C3.

Una vez finalizados los análisis anteriores, y con el fin de evaluar la precisión de los resultados, se realizó una comparación entre las variaciones laterales de tensión obtenidas con el método de Dost, y las variaciones calculadas en base a la ecuación 2.19 presentada en el capítulo 2 [15]. Las comparaciones se muestran en la Figura 4.21.

Para obtener esta comparación, primero se utilizó el mapa de tensiones locales  $V_a(r)$  obtenido con el método de Dost para el cálculo de  $R_S$ . El método de Dost obtiene  $V_a(r)$  según se expone en el epígrafe 2.3, información que utiliza para obtener el mapa de  $R_S$ . Se seleccionó de este mapa  $V_a(r)$  el perfil a comparar (marcado en cada caso en amarillo en la Figura 4.21) y se calculó la diferencia de tensiones entre cada punto de ese perfil, y un punto de referencia arbitrario. Esa diferencia de tensiones se compara con la obtenida con la ecuación 2.19. La ecuación se aplicó al mismo conjunto de puntos, empleando las mismas imágenes de EL utilizadas para obtener los mapas de  $R_S$  de cada celda.

Finalmente, se calculó en cada punto el error entre ambas curvas, cuyo valor máximo fue inferior al 1,7% respecto del valor de  $V_a(r)$  obtenido con el método de Dost. Aunque esta comparación sea válida solamente si se asume un patrón de recombinación homogéneo, el buen ajuste entre ambos perfiles en las tres gráficas es indicativo de la buena precisión del método, tanto en celdas de silicio monocristalino, como extendida también a las celdas de silicio policristalino.

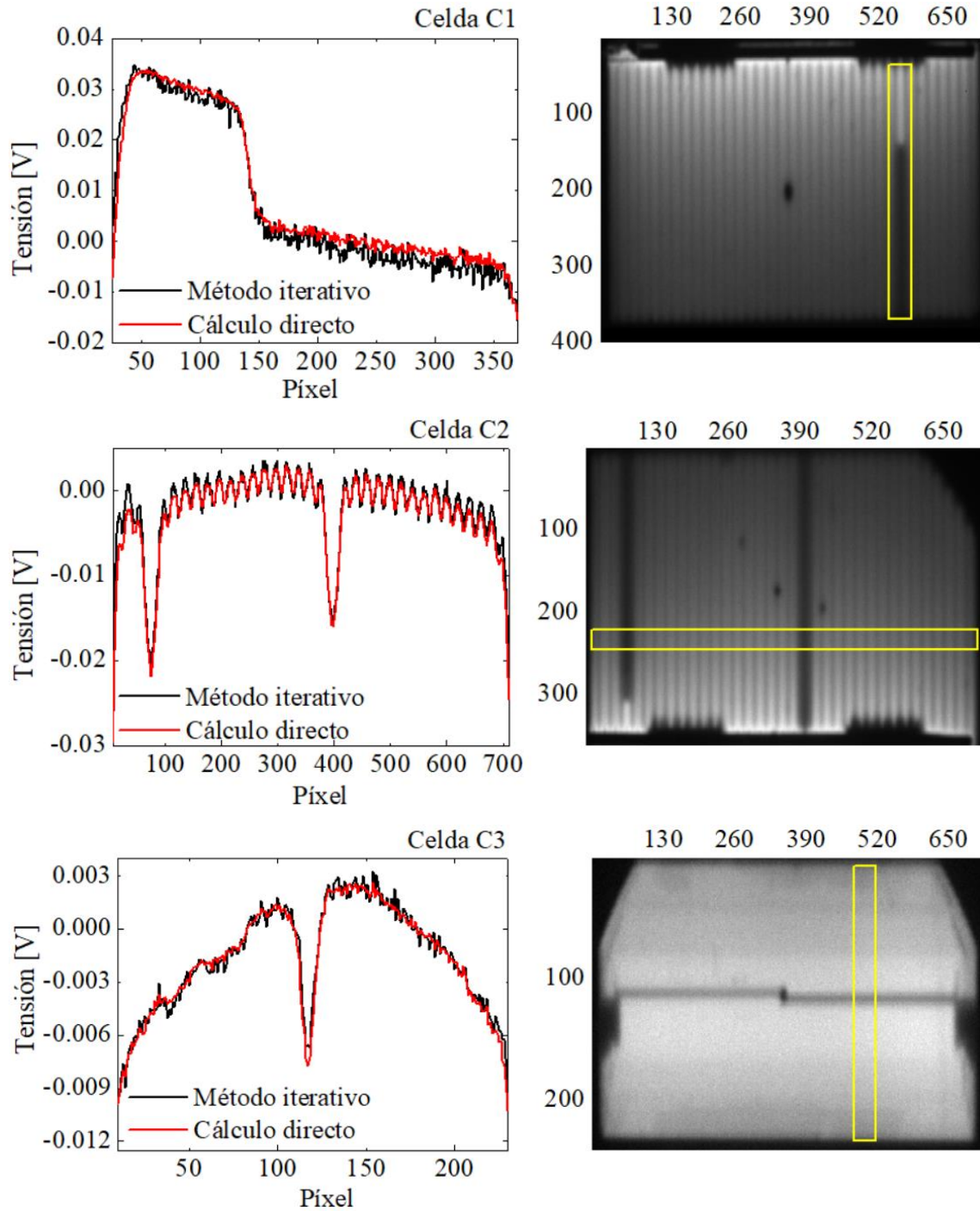


Figura 4.21: Perfiles de tensión obtenidos mediante el método iterativo de Dost, y la ecuación 2.19.

## 4.2 Caracterización del panel de silicio policristalino

Los ensayos se realizaron posteriormente a un panel solar con nueve celdas de silicio policristalino de  $42.94 \text{ cm}^2$ . A continuación se describen las condiciones en que se llevaron a cabo los ensayos, y los resultados obtenidos.

### Mediciones preliminares

En la Figura 4.22 se muestran las imágenes de fotografía visible, EL y las curvas IV a oscuras y bajo iluminación para el panel de silicio policristalino. Las celdas que componen el módulo se enumeran de P1 a P18 a modo de referencia futura. De las curvas 4.2.1 se extraen los parámetros  $V_{OC} = 10,0 \text{ V}$  e  $I_{SC} = 1,14 \text{ A}$ , así como las curvas de potencia-tensión, de la cual se determina la potencia máxima y la eficiencia. La Tabla 4.1 muestra la comparación entre los valores medidos y los valores de chapa.

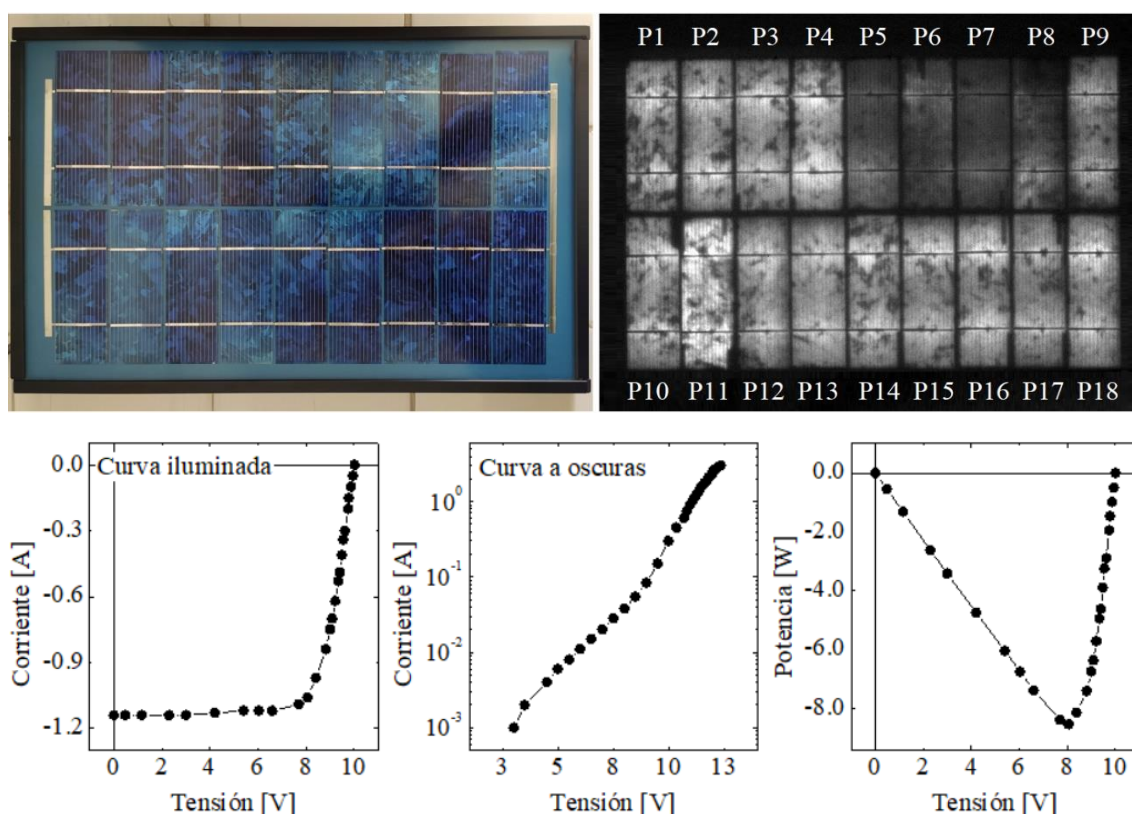


Figura 4.22: Curva a oscuras, curva bajo iluminación y curva de potencia-tensión para el panel estudiado.

|                           | Valor de chapa | Valor medido |
|---------------------------|----------------|--------------|
| $V_{OC} \text{ [V]}$      | 10,3           | 10,0         |
| $I_{SC} \text{ [A]}$      | 1,23           | 1,14         |
| $P_{MAX} \text{ [W]}$     | 9,4            | 8,6          |
| $I_{P_{MAX}} \text{ [A]}$ | 1,14           | 1,06         |
| $V_{P_{MAX}} \text{ [V]}$ | 8,2            | 8,1          |

Tabla 4.2: Comparación entre valores medidos y valores de chapa para el panel estudiado.



Con el mismo método implementado para las celdas en el apartado anterior, se obtiene el factor de idealidad  $n_{id} = 1,84$  y la resistencia serie  $R_s = 0,13 \Omega$  para el módulo, considerados como valores promedio para las 18 celdas conectadas en serie.

### Obtención de imágenes de electroluminiscencia

El procedimiento para obtener las imágenes de electroluminiscencia fue el mismo que para las celdas, aunque fue necesario alejar 3-4 veces más el módulo de la cámara para <sup>4.2.2</sup>capturar todas las celdas en una misma imagen. Para asegurar una buena recolección de luz aún a estas distancias, se aumentó el tiempo de exposición a 4 segundos.

En total, se tomaron 20 imágenes a distintos niveles de polarización, desde 0,15 A hasta 3 A, para conseguir imágenes en un amplio rango de corrientes. A modo de ejemplo, algunas de estas imágenes se muestran en la Figura 4.23.

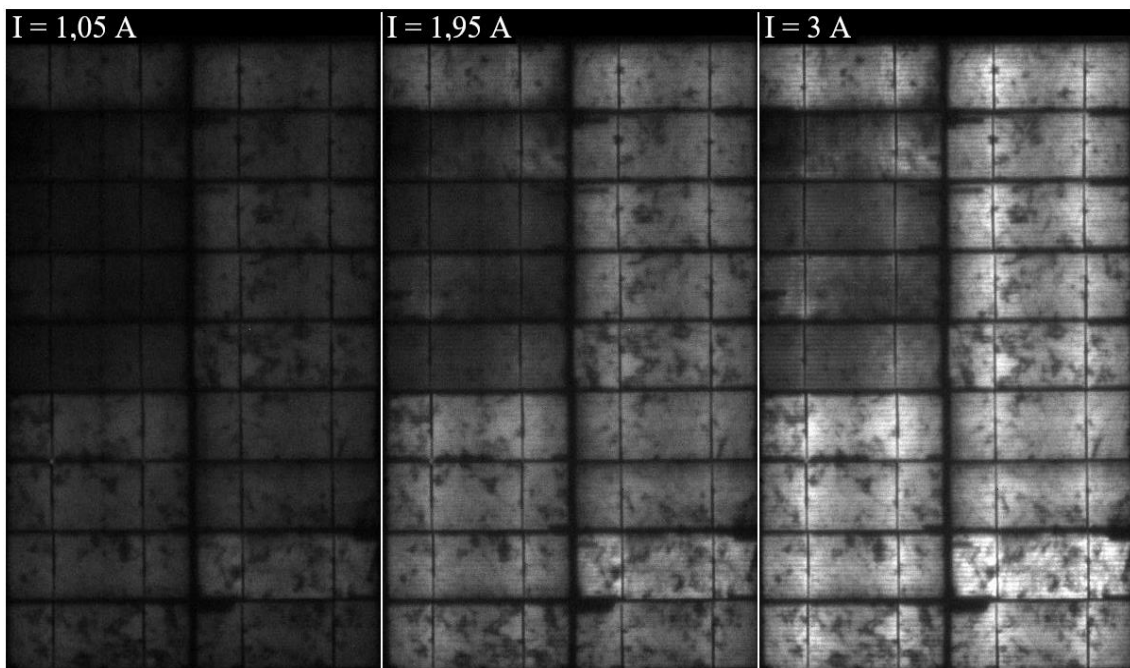


Figura 4.23: Imágenes de electroluminiscencia del panel para distintos niveles de polarización.

Aquí también se puede observar la dependencia que existe entre la intensidad de la señal de electroluminiscencia y la corriente de polarización directa. En comparación a la característica corriente-tensión a oscuras, en la Figura 4.24 se observa que solamente algunos puntos se ajustan entre las curvas. Esto se debe a que el comportamiento de este módulo se aleja del comportamiento idealizado para la dependencia de la emisión de EL en función de la tensión, aunque el origen de esta discrepancia corresponde a un estudio específico que escapa al objetivo de este trabajo.

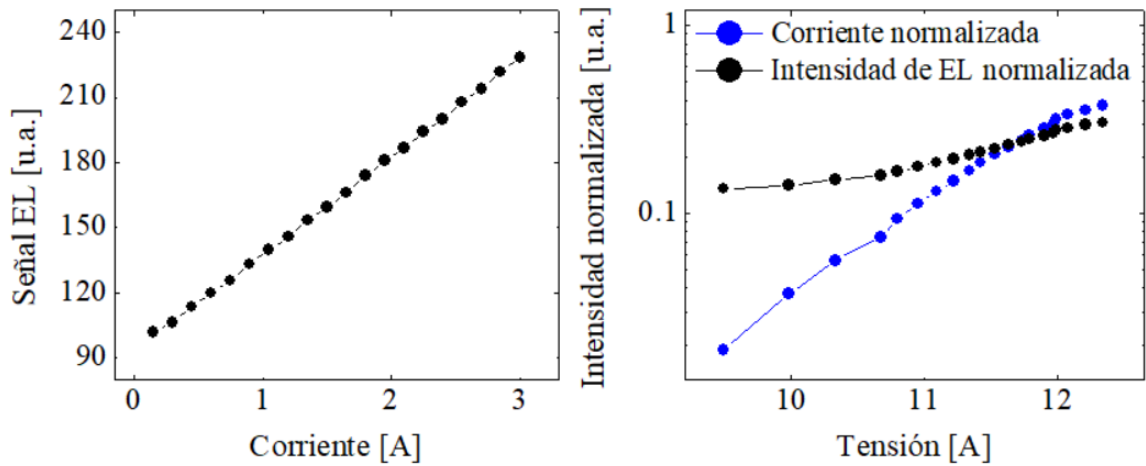


Figura 4.24: Intensidad de la señal de EL medida en función de las corrientes de polarización (izquierda), y comparativa entre corriente y señal de EL normalizadas en función de la tensión para cada celda (derecha).

### Análisis cualitativo de las imágenes de electroluminiscencia

4.2.3 La Figura 4.25 muestra la imagen de EL obtenida del panel a 3 A, de la cual se pueden observar claramente contrastes debidos a la variación local de la intensidad de EL.

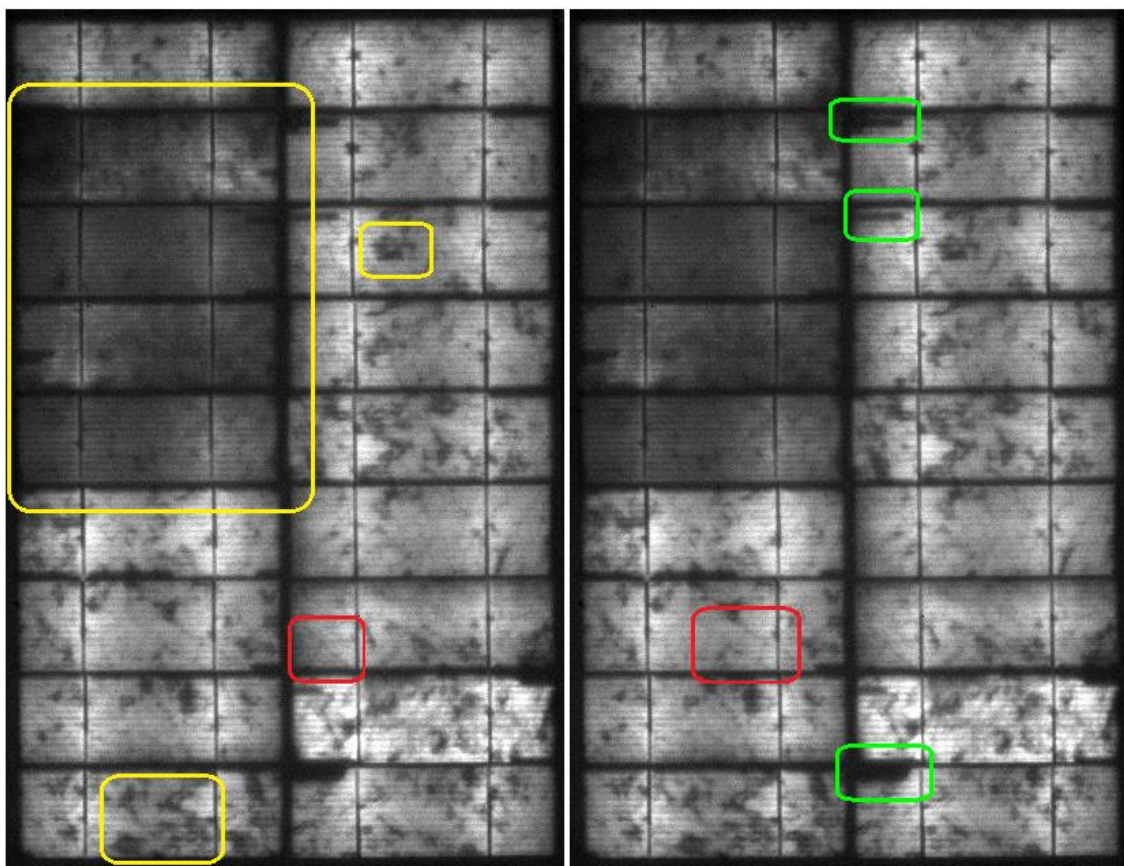


Figura 4.25: Imágenes de electroluminiscencia del panel policristalino a una corriente inyectada de 3 A.

En amarillo, se señalan ejemplos de regiones con defectos intrínsecos del material policristalino, como bordes de grano y dislocaciones cristalinas. También en amarillo, se

destaca un ejemplo de la emisión no uniforme de la señal de EL entre celdas del mismo módulo, agrupando las 4 celdas de menor emisión. En rojo, se señalan regiones que ejemplifican la reducción de la intensidad de la señal debida a microfracturas, y en verde, se observan interrupciones de dedos.

Los detalles mencionados anteriormente se estudiaron con mayor profundidad mediante imágenes térmicas, tal como se muestra en la Figura 4.26. La máxima variación de temperatura observada en las imágenes fue inferior a 2 K, y se observa un aumento en la zona central debido a reflejos del sistema de medición que no se pudieron evitar en este caso. No se observa la existencia de puntos calientes relacionados a defectos y variaciones locales, posiblemente debido a que el vidrio cobertor del panel tiende a uniformizar la temperatura. De todos modos, podemos excluir la presencia de *shunts* que produzcan un calentamiento intensivo.

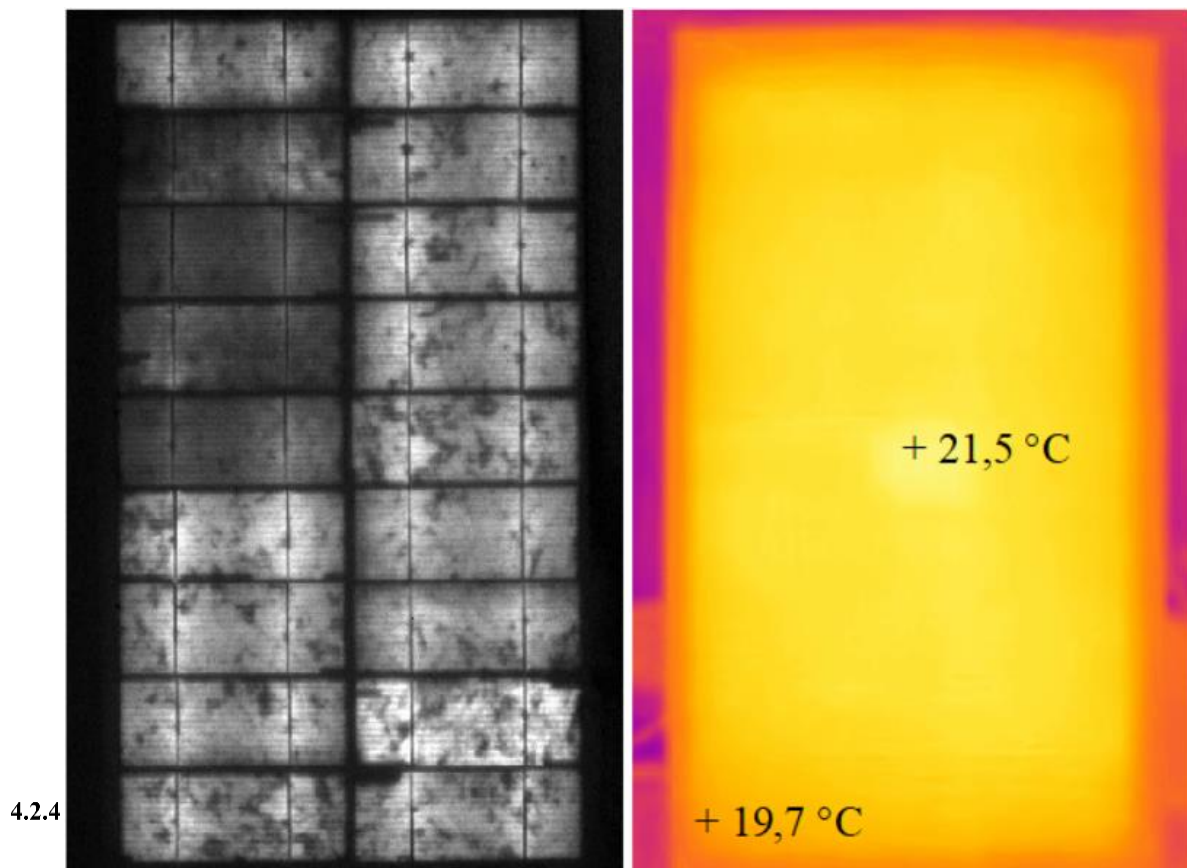


Figura 4.26: Comparación de las imágenes de electroluminiscencia y térmicas del panel.

#### **Análisis cuantitativo de los datos**

A continuación, se procedió a determinar la distribución de los potenciales eléctricos en cada una de las celdas del módulo. Se obtuvieron las tensiones en bornes de cada celda

mediante la técnica expuesta en el apartado 2.3. Como resultado, las 20 imágenes de EL resultan en 20 puntos de corriente-tensión para cada celda, con los cuales se grafica la característica corriente-tensión a oscuras en cada caso. Un ejemplo para la celda P8 se muestra en la Figura 4.27.

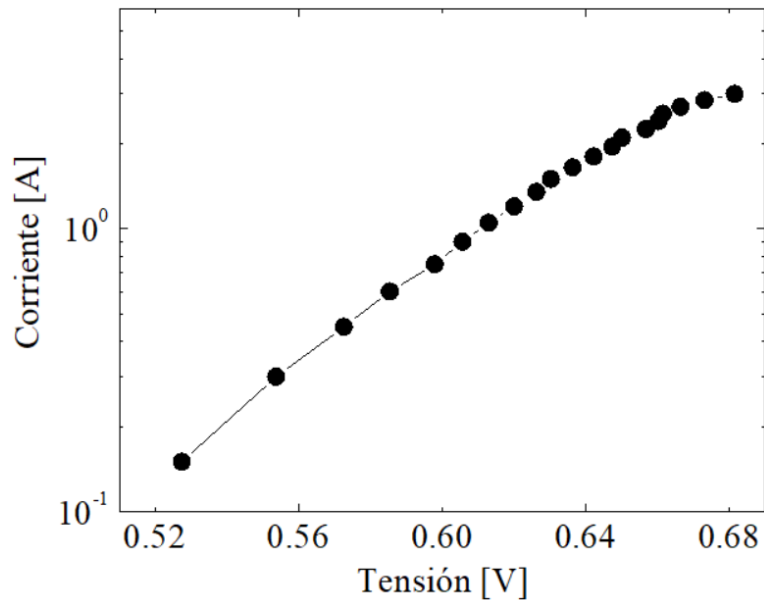


Figura 4.27: Característica  $I(V)$  a oscuras para la celda P8 del módulo estudiado, obtenida de las imágenes de EL.

El valor de resistencia calculado se utilizó como referencia de resistencia serie global,  $R_{Sg}$ , de cada celda. La obtención de las curvas  $I(V)$  permitió un estudio más profundo de las imágenes de EL mediante la obtención de mapas de  $R_s$  y  $j_0$  de las celdas. Para esto, se eligieron las celdas P8, P9, P11 y P16, de modo a poder estudiar diferentes defectos y detalles observados en las imágenes de EL del panel.

El método utilizado fue el mismo método iterativo desarrollado por Dost et al. Los mapas permitieron la visualización de los efectos resistivos y de recombinación en cada caso. Cabe destacar que, en comparación con las celdas estudiadas en el apartado anterior, en este panel es notable la presencia de efectos de recombinación por defectos (no radiante), apreciables en los contrastes de los mapas de  $j_0$ . Esto es debido a los defectos intrínsecos al silicio policristalino, tales como dislocaciones y bordes de granos, regiones donde las pérdidas por recombinación no-radiante (por defectos) son mayores.

Como ya se hizo en el apartado anterior, inicialmente se obtienen mapas de  $R_s$  y  $j_0$  en unidades arbitrarias. Estos mapas a continuación se multiplican por un factor de escala  $f$ , con el fin de obtener un mapa cuyo valor promedio de  $R_s$  coincida con el valor global de  $R_s$  de la celda. El valor utilizado en este texto es el mismo para todas las celdas, una

aproximación que considera que están hechas con los mismos materiales, métodos y dopajes. En este caso,

$$R_{Sg} = 0,31 \Omega \text{ cm}^2$$

Las siguientes imágenes muestran los mapas de  $R_s$  y  $j_0$  de las celdas seleccionadas para la observación de efectos particulares.

La Figura 4.28 muestra los mapas de la celda P8, que exhiben algunos efectos resistivos ya estudiados anteriormente, tales como dedos cortados y aumentos generalizados en la resistencia serie en regiones más alejadas de los *busbars*, señalados en rojo y amarillo. Estos defectos también se observan en mayor o menor medida en las demás celdas estudiadas. Respecto a esta celda, resulta difícil identificar contrastes de recombinación comparados al contraste debido al efecto resistivo.

La celda P9 (Figura 4.29), por otro lado, presenta ciertos contrastes en el mapa de  $j_0$  que podrían atribuirse a los defectos intrínsecos del material policristalino, tales como bordes de grano o dislocaciones, o también posibles *shunts*.

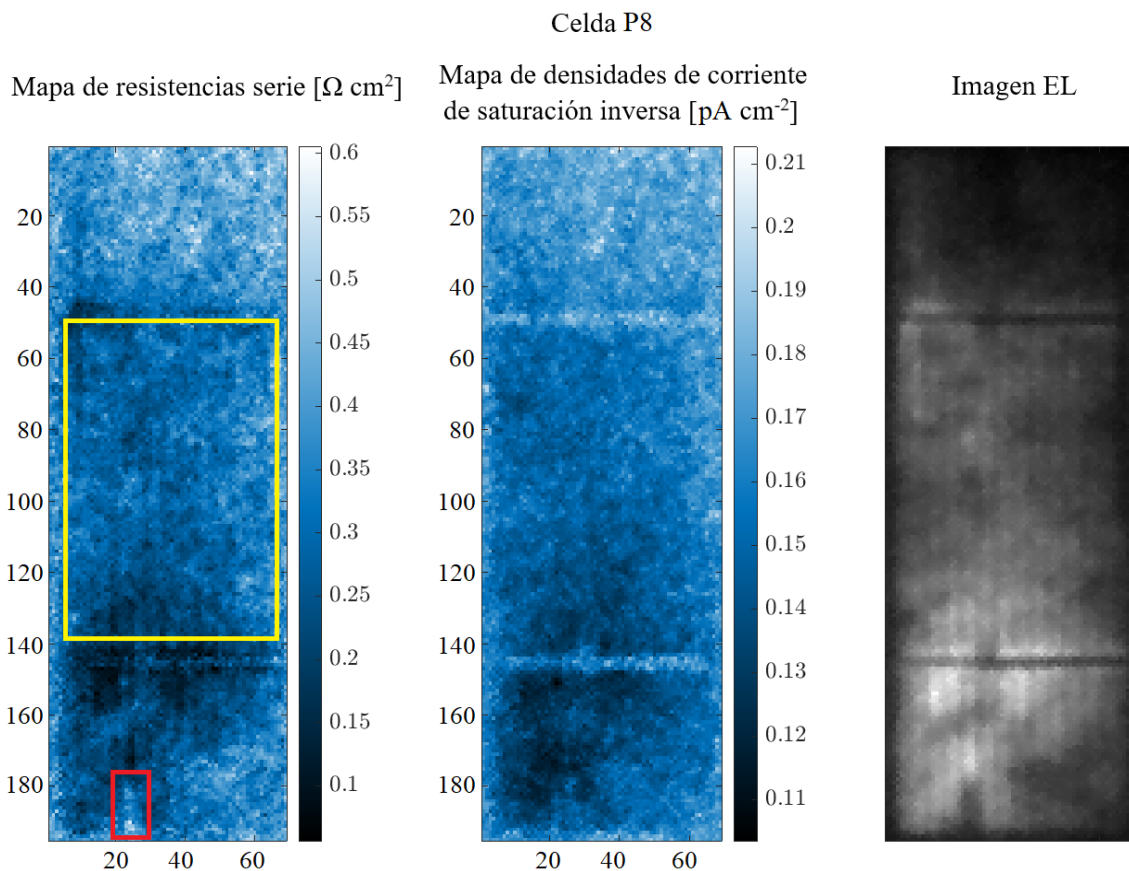


Figura 4.28: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$ , e imagen de EL para la celda P8.

Estos efectos se traducen en aumentos locales en  $j_0$ ; algunos ejemplos se señalan en verde en la Figura 4.29. Identificar la causa exacta de estas observaciones requiere un estudio más detallado por otros métodos.

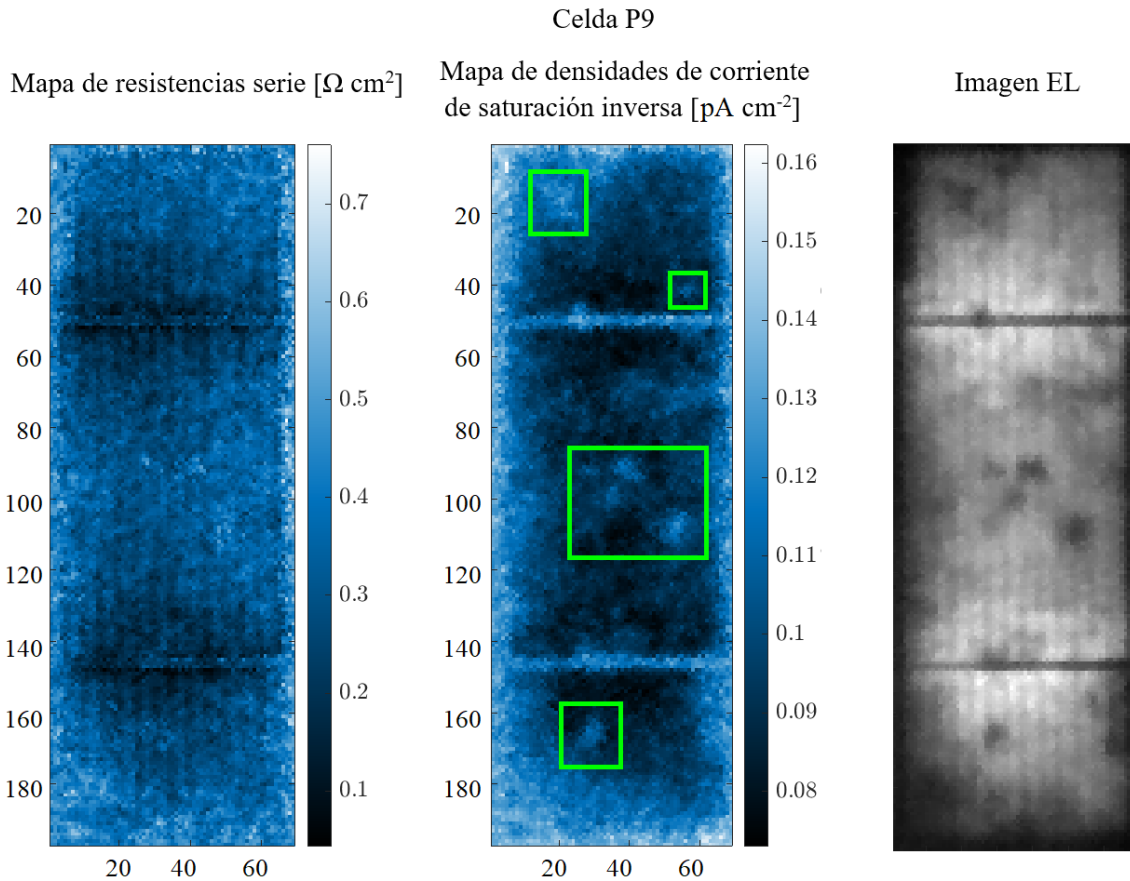


Figura 4.29: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$ , e imagen de EL para la celda P9.

Los efectos mencionados también son visibles en los mapas de la celda P11, y los perfiles de la Figura 4.30. En comparación a las demás celdas, se destaca una menor variación en los valores de resistencia serie. Incluso la variación generalizada que comúnmente se observa para puntos más alejados de los *busbars* es menor para esta celda.

Sin embargo, se observan aumentos locales que parecen ser debido a defectos de dedos en las esquinas. El perfil de la Figura 4.30 revela incrementos locales en  $j_0$  que se corresponden con las regiones indicadas con números de 1 a 5. De la región entre *busbars* en el perfil, el aumento relativo en  $j_0$  para los contrastes marcados con 2 y 3 fue de aproximadamente 24% respecto al valor medio de  $0,073 \text{ pA cm}^{-2}$  de la celda P11.

Celda P11

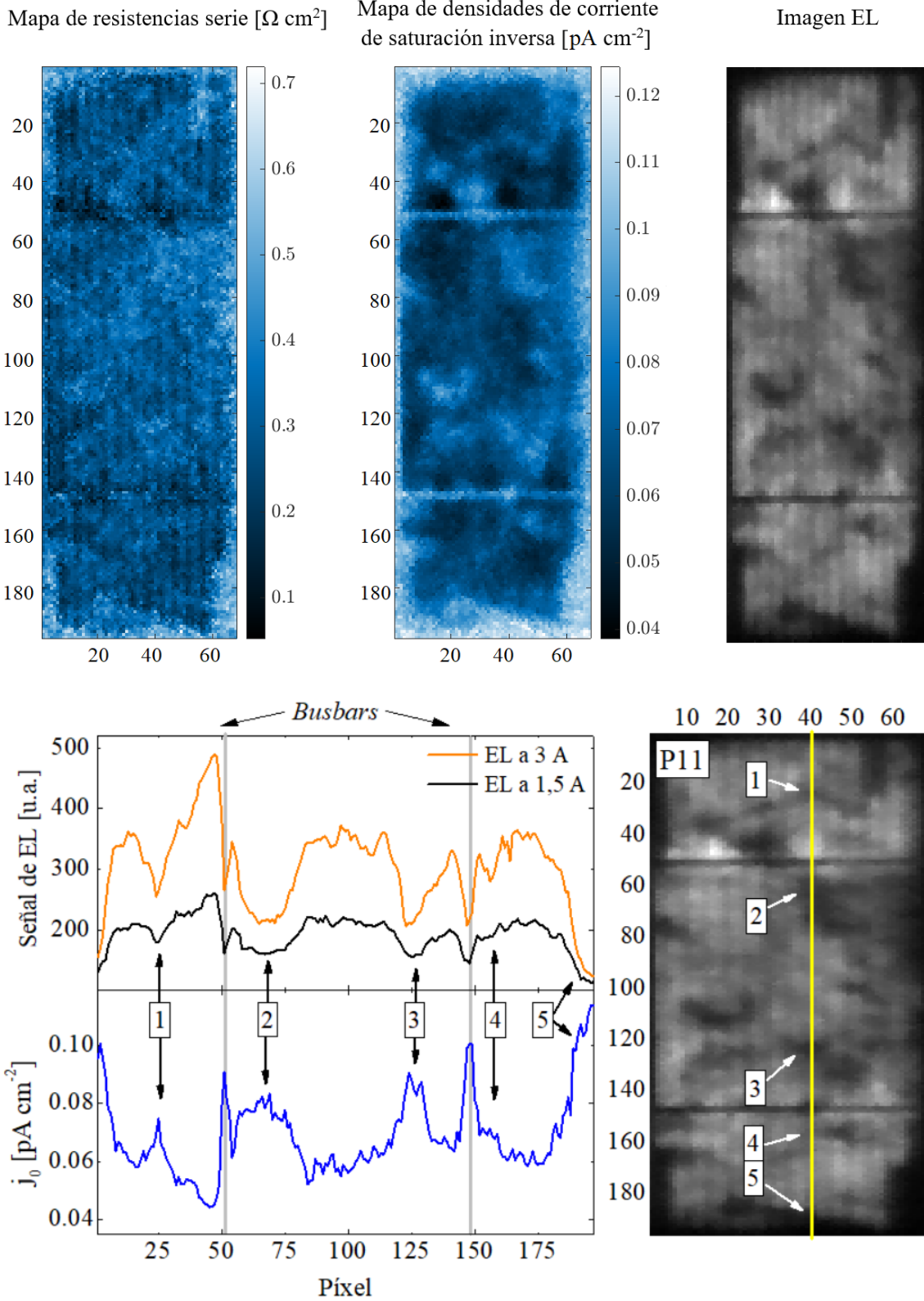


Figura 4.30: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$ , e imagen de EL para la celda P11 (parte superior) y perfiles de  $j_0$  e intensidades de EL (parte inferior) a lo largo de la línea vertical amarilla marcada en la celda P11.

En la Figura 4.31 se muestran los mapas de  $R_s$  y  $j_0$  para la celda P16, mientras que la Figura 4.32 muestra el perfil de  $R_s$  a lo largo de una región con un defecto de dedo en la celda P16.

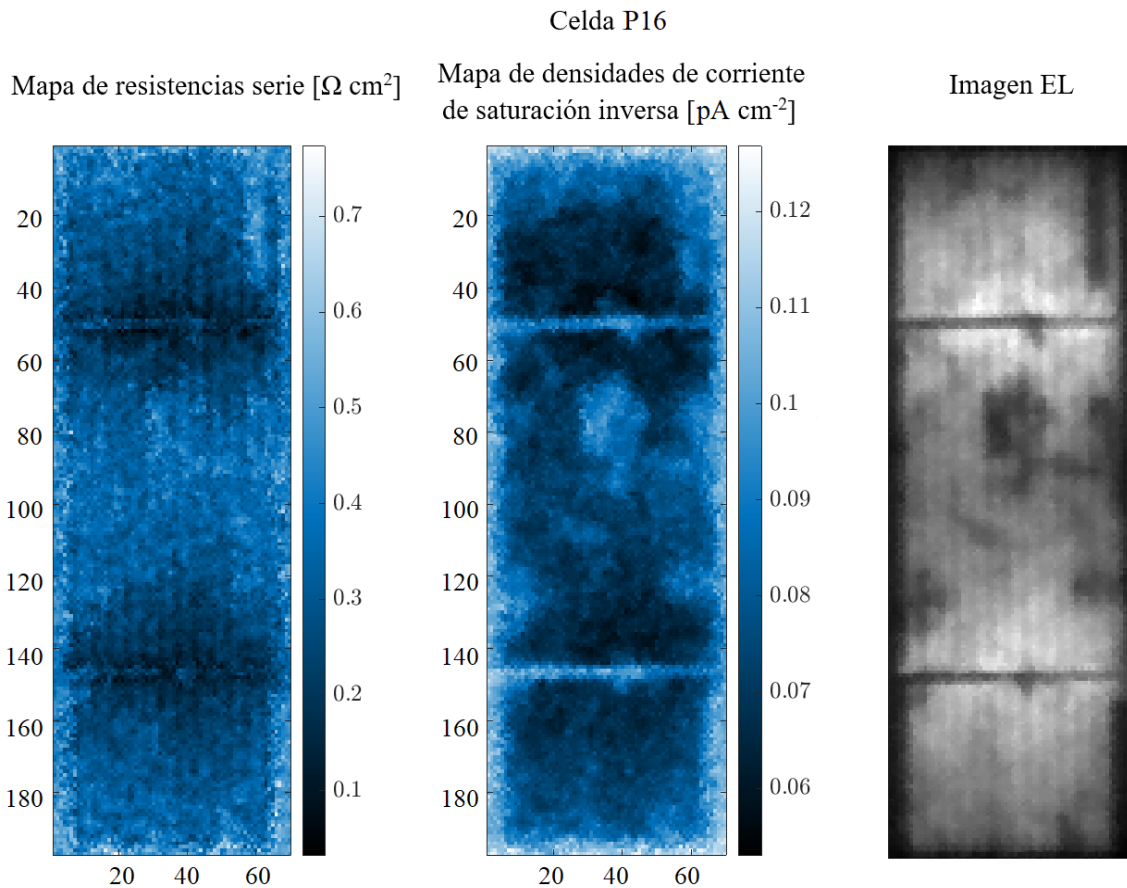


Figura 4.31: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$ , e imagen de EL para la celda P16.

El defecto de dedo lleva a un aumento de hasta un 93% respecto al valor global de  $0,31 \Omega \text{ cm}^2$  de resistencia serie de la celda. Asimismo, la resistencia serie aumenta de forma generalizada en las regiones más alejadas a los *busbars*, tal como la zona señalada con un cuadrado amarillo en la misma Figura 4.32. Según se observa en el perfil, este aumento generalizado alcanza aproximadamente un 35% respecto al valor global de resistencia serie de la celda.



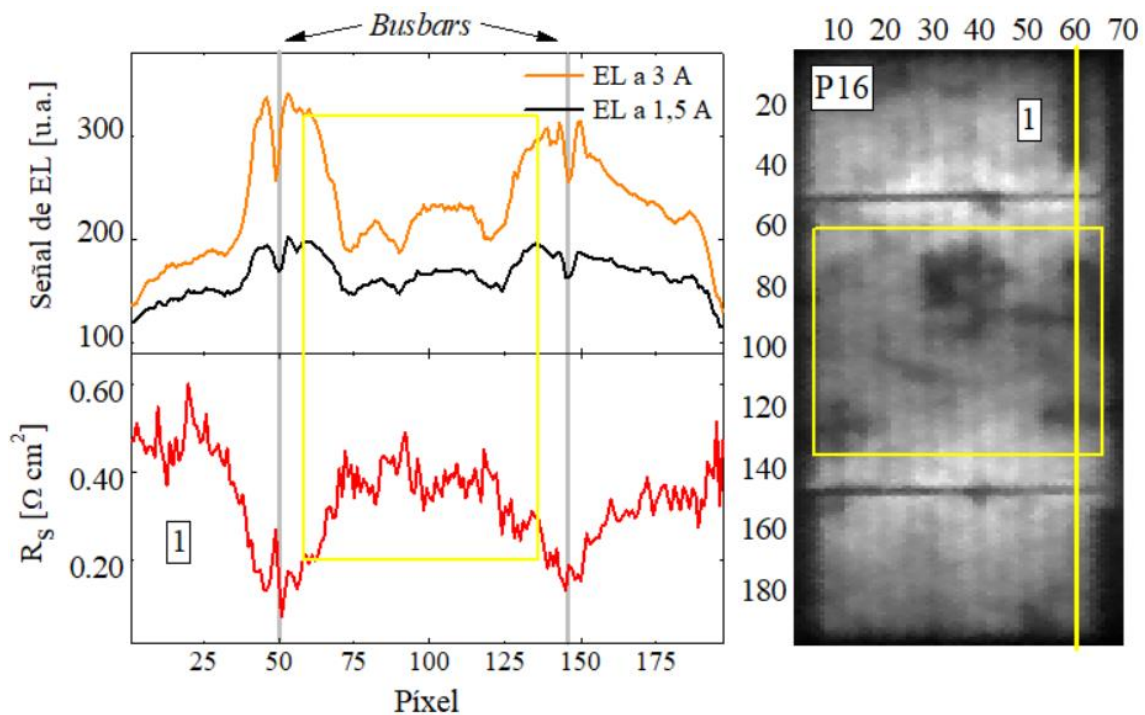


Figura 4.32: Mapas de  $R_s$  y  $j_0$ , e imagen de EL para la celda P16 (parte superior) y perfiles de  $R_s$  e intensidades de EL (parte inferior) a lo largo de la línea vertical amarilla marcada en la celda P16.

#### 4.2.5 **Apreciaciones generales sobre la metodología**

Cabe señalar que el sistema óptico utilizado para las mediciones define la resolución de las imágenes obtenidas de cada celda. Las imágenes pueden optimizarse variando la configuración de la cámara, lente y panel si se desea mejorar la calidad de los resultados. Por ejemplo, en el estudio del panel, se podría encuadrar cada celda de forma individual (acercando la cámara), o agrupar algunas celdas, obteniendo así una mejor resolución en las imágenes de EL.

Otro efecto sobre la calidad de las imágenes es la intensidad de la señal EL, como ya se explicó anteriormente. Mayores tiempos de exposición podrían mejorar los resultados, especialmente a bajas corrientes de polarización, donde el ruido afecta en mayor medida los resultados. En ambos casos es necesario llegar a un compromiso respecto del tiempo a disponer para llevar a cabo los ensayos, debido a que el tiempo es un factor limitante para aplicaciones a gran escala de los ensayos con imágenes de EL en el campo.

Además de las observaciones anteriores con respecto a la calidad de las imágenes, es importante reconocer los posibles desvíos en la aproximación de las tensiones de

operación de las celdas individuales. El método utilizado requiere una imagen a bajo nivel de polarización tal que la corriente cumpla la condición  $I \leq 10\% I_{SC}$  [9]. De requerirse una cuantificación del error introducido, se precisaría obtener referencias de las tensiones reales medidas en bornes de las celdas, en cuyo caso sería necesario abandonar la ventaja de ensayo no destructivo.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se implementó un sistema de medición de electroluminiscencia (EL) para la obtención de imágenes EL con un sensor CCD. Con el sistema desarrollado, se caracterizaron tres celdas solares monocristalinas y un módulo solar de silicio policristalino. Por otro lado, mediante una cámara infrarroja, se obtuvieron imágenes térmicas de las muestras con el fin de obtener información complementaria para su caracterización, evaluar la aplicabilidad de los análisis realizados, y controlar la temperatura durante los ensayos.

La realización del ensayo de EL fue exitosa y demostró su enorme potencial como método de ensayo no destructivo, para la observación de defectos y del comportamiento local de las celdas. Las mediciones realizadas permitieron llevar a cabo análisis tanto cualitativos como cuantitativos sobre las propiedades electrónicas y ópticas de las celdas y del módulo. De esta forma, se demostró la relevancia de este ensayo en aplicaciones de control de calidad, monitoreo de celdas y caracterización no destructiva de celdas y módulos solares.

Los métodos llevados a cabo permitieron un mejor entendimiento de los fenómenos involucrados en el patrón de emisión de EL de las celdas solares de silicio mono y policristalino, así como de la detección de algunos defectos como interrupciones de dedos, *shunts* y áreas de alta recombinación en el material. La concordancia entre los distintos análisis y los resultados esperados permitieron corroborar el funcionamiento correcto del sistema implementado. También fue necesario reconocer la importancia de realizar estudios detallados sobre las imágenes de EL para obtener resultados confiables, debido a la pluralidad de las causas y efectos detrás de las áreas de contraste identificadas en cada imagen.

Asimismo, la aplicación del ensayo de EL permitió una mirada hacia el interior del módulo y a cada celda que lo compone, además de la visión general proporcionada por la imagen de EL del módulo completo. Sin embargo, es recomendable combinar este método con otros para lograr una determinación precisa de los parámetros globales tanto para celdas como para módulos. También es necesario llegar a un compromiso entre la calidad de las imágenes deseada y las restricciones de costo y duración del ensayo.

Finalmente, el ensayo de EL ha demostrado ser una herramienta altamente versátil y adaptable, capaz de generar imágenes de alta calidad que resaltan su potencial para abarcar una amplia variedad de muestras y brindar flexibilidad en el equipo utilizado.

### **5.1 Recomendaciones a futuro**

El sistema de medición implementado puede mejorarse a futuro, con el fin de aprovechar al máximo las ventajas que proporciona el ensayo de EL; por lo tanto, se proponen las siguientes modificaciones:

- desarrollar un sistema automatizado de mediciones, de procesamiento de imágenes y obtención de mapas, mejorando la velocidad y precisión del ensayo,
- emplear una fuente de luz difusa en el rango de longitudes de onda de 950 a 1000 nm para lograr un primer enfoque. En este caso, es importante evitar la reflexión de fuentes de luz directas a la cámara. Luego,
- utilizar una cámara con sensor de InGaAs debido a su sensibilidad, significativamente superior a la del sensor CCD. Esto reduciría el ruido en las mediciones,
- en cada caso, tomar varias imágenes de EL y obtener un promedio de todas, buscando reducir el error en las mediciones. Por último,
- aumentar el tiempo de exposición e implementar filtros que corten la luz de longitudes de onda fuera del rango esperado,
- en caso de aumentar el tiempo de exposición, se recomienda también una cámara con mayor capacidad de enfriamiento, en especial para tiempos mayores a 10 s.

Las últimas tres recomendaciones son ventajosas solamente para aplicaciones donde no es prioridad la reducción del tiempo de duración de los ensayos.

## 6 Bibliografía

- [1] Bojek, P. Solar. IEA. Recuperado el 21 de septiembre de 2023, de <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- [2] Fuyuki, T., Kondo, H., Yamazaki, T., Takahashi, Y. and Uraoka, Y. (2005) *Photographic Surveying of Minority Carrier Diffusion Length in Polycrystalline Silicon Solar Cells by Electroluminescence*. Applied Physics Letters, 86, 262108. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1978979>
- [3] Kurt Taretto, *Celdas Solares*, Nueva Librería, Buenos Aires (2015)
- [4] Uwe Rau, *Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells*, Physical Review B 76, 085303 (2007).
- [5] Pvpas, Iea & Paggi, Marco. (2018). *Task 13: Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications*.
- [6] Kirchartz, T., Helbig, A., Pieters, B. E., & Rau, U. (2011). *Electroluminescence analysis of solar cells and solar modules*. In Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells (pp. 61–80). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [7] Dost, G., Höffler, H., & Greulich, J. M. (2021). *Advanced series resistance imaging for silicon solar cells via electroluminescence*. Physica Status Solidi (a), 218(6), 2000546. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000546>
- [8] Breitenstein, Otwin & Frühauf, Felix & Hinken, David. (2016). *Effective Diffusion Length and Bulk Saturation Current Density Imaging in Solar Cells by Spectrally Filtered Luminescence Imaging*. IEEE Journal of Photovoltaics. 6. 1-12. 10.1109/JPHOTOV.2016.2571621.
- [9] Potthoff, T., Bothe, K., Eitner, U., Hinken, D., & Köntges, M. (2010). *Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging: Voltage distribution in pv modules by el imaging*. Progress in Photovoltaics, 18(2), 100–106. <https://doi.org/10.1002/pip.941>
- [10] Ebner, Rita & Zamini, Shokufeh & Újvári, G. (2010). *Defect Analysis in Different Photovoltaic Modules Using Electroluminescence (EL) and Infrared (IR)-Thermography*. 333-336. 10.4229/25thEUPVSEC2010-1DV.2.8.

- [11] Santa Barbara Instrument Group. (1999). *Operating Manual CCD Camera Models ST-7E, ST-8E and ST-9E*. <https://diffractionlimited.com/legacy-product-support/> (25/01/2023 último acceso).
- [12] Bhan, R.K., Saxena, R.S., Jalwania, C.R., & Lomash, S. (2009). *Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques (Review Paper)*. *Defence Science Journal*, 59, 580-589.
- [13] FLIR ONE Pro Datasheet.
- [14] Fuyuki, T., Kondo, H., Kaji, Y., Ogane, A., & Takahashi, Y. (2007). *Analytic findings in the electroluminescence characterization of crystalline silicon solar cells*. *Journal of applied physics*, 101(2), 023711. <https://doi.org/10.1063/1.2431075>
- [15] Ver p.64 de la ref. [5].
- [16] Hollows, G., James, N. *Wavelength Effects on Performance*. Section 3.3 of the Imaging Resource Guide, Edmund Optics Knowledge Center Application Note. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/wavelength-effects-on-performance/> (05/02/2023 último acceso).
- [17] Roy, S., Kumar, S., Meena, R., & Gupta, R. (2019). *Investigation on shunt severity in PV modules by electroluminescence imaging and lock-in thermography*. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20192019-4AV.2.22>
- [18] Breitenstein, O., Khanna, A., Augarten, Y., Bauer, J., Wagner, J.-M., & Iwig, K. (2010). *Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells*. *Physica Status Solidi. Rapid Research Letters: PSS-RRL*, 4(1–2), 7–9. <https://doi.org/10.1002/pssr.200903304>
- [19] Haunschild, J., Glatthaar, M., Kasemann, M., Rein, S., & Weber, E. R. (2009). *Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence*. *Physica Status Solidi. Rapid Research Letters: PSS-RRL*, 3(7–8), 227–229. <https://doi.org/10.1002/pssr.200903175>
- [20] Breitenstein, Otwin, Bauer, J., Trupke, T., & Bardos, R. A. (2008). *On the detection of shunts in silicon solar cells by photo- and electroluminescence imaging*. *Progress in Photovoltaics*, 16(4), 325–330. <https://doi.org/10.1002/pip.803>
- [21] Kasemann, M., Grote, D., Walter, B., Kwapil, W., Trupke, T., Augarten, Y., Bardos, R. A., Pink, E., Abbott, M. D., & Warta, W. (2008). *Luminescence*

- imaging for the detection of shunts on silicon solar cells*. Progress in Photovoltaics, 16(4), 297–305. <https://doi.org/10.1002/pip.812>
- [22] Hinken, D., Ramspeck, K., Bothe, K., Fischer, B., & Brendel, R. (2007). *Series resistance imaging of solar cells by voltage dependent electroluminescence*. Applied physics letters, 91(18), 182104. <https://doi.org/10.1063/1.2804562>
- [23] Bedrich, K. G., Luo, W., Pravettoni, M., Chen, D., Chen, Y., Wang, Z., Verlinden, P. J., Hacke, P., Feng, Z., Chai, J., Wang, Y., Aberle, A. G., & Khoo, Y. S. (2018). *Quantitative electroluminescence imaging analysis for performance estimation of PID-influenced PV modules*. IEEE journal of photovoltaics, 8(5), 1281–1288. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2018.2846665>
- [24] Bedrich, K. G., Bliss, M., Betts, T. R., & Gottschalg, R. (2016). *Electroluminescence imaging of PV devices: Camera calibration and image correction*. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).
- [25] Bedrich, K. G., Wang, Y., & Khoo, Y. S. (2019). *Quantitative electroluminescence imaging of PV modules: Low-frequency blur removal*. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19278.51526>