

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Software de análisis de imágenes en ensayos de electroluminiscencia (EL) de dispositivos fotovoltaicos (FV).



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Fermín Aranguren Górriz

Marta Solano Goñi (UPNa)

Mikel Ezquer Mayo (CENER)

Pamplona, 18 de Junio del 2014





Índice

Tabla de contenido

Definiciones y Abreviaturas	5
Introducción y Objetivos	7
Antecedentes	9
Introducción	9
Ensayo de Electroluminiscencia en Oscuridad	9
Fundamentos Teóricos del ensayo de EL	11
Metodología del ensayo de EL	13
Proceso del ensayo de EL	15
Resultados de Ejecución	19
Introducción.	19
Módulo Fotovoltaico	19
Célula Fotovoltaica	23
Otra Información de Interés	25
Análisis de Resultados y Validación	27
Introducción.	27
Calibración Cámara	28
Validación Tensiones	32
Manual de Usuario	37
1. Instalación.	38
2. Cómo comenzar.	39
3. Pantalla de Inicio	40
4. Análisis Electroluminiscencia - Módulo PV	42
5. Análisis Electroluminiscencia - Célula PV.	45
6. Exportación Datos y Nomenclatura.	46
Manual de Programador	49

Introducción.....	49
cargamat.jpg >----< cargamat_ingles.jpg	49
Cargar_tiff.m	50
cmapverde_rojo.mat.....	50
convertir.jpg >----< convertirtiff.png.....	51
Correccion_imagen_EL.m	51
corregir.jpg	52
Cortar_imagen.m	52
DentroFuera.m	53
Deteccion_celulas.m	53
Deteccion_celulas_monocristalino.m	55
Ficheros_Excel.m.....	56
fotovoltaica.png	57
Grietas.m	57
Inicio.fig >----< Inicio.m	58
logo-cener-eng.jpg	58
Luminiscencia_celulas_ISE_iterativo.m	59
Luminiscencia_celulas_modulo.m	60
Luminiscencia_celulas_modulo_ISE_iterativo.m.....	60
Luminiscencia_modulos.m.....	61
matriz_correccion.mat	61
panelEL.fig >----< panelEL.m	61
panelELcelulas.fig >----< panelELcelulas.m	63
Parametros.fig >----< Parametros.m	64
Plantilla.xlsm	64
Porc_grietas_C.png >----< Porc_grietas_C_english.png.....	65
principal-5.jpg.....	65
progressbar_mod.m.....	65
regiongrowing.m	66
Estructura del Programa y Flujo de Datos.....	66
Bibliografía.....	69
Anexos.....	71

Definiciones y Abreviaturas

- **Buses:** La parte del sistema eléctrico interno de los módulos fotovoltaicos que conecta los fingers y los tabins. Cada célula puede tener 2 o 3 buses.
- **Damp Heat Test (DHT):** Ensayo de degradación acelerada que consiste en la aplicación al módulo fotovoltaico atmósferas a distintas temperaturas y humedad con el objetivo de conocer la calidad del aislamiento y la pérdida de potencia por factores ambientales a lo largo del tiempo.
- **EL:** Abreviatura de electroluminiscencia.
- **Ensayo curva I-V:** Ensayo para determinar toda la curva I-V de trabajo, y en el cual se pueden determinar otros parámetros adicionales como la resistencia del módulo.
- **Fill-Factor (FF):** Factor de potencia de una célula o módulo. Es la relación entre la potencia máxima que puede generar el sistema y el producto de la I_{SC} por V_{OC} .
$$FF = \frac{P_{Max}}{P_T} = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$
- **Fingers:** Conductores eléctricos que llevan la energía producida por la célula hasta los buses. Cada célula puede tener en torno a 100 fingers en su cara frontal, dispuestos de forma perpendicular a los buses y mucho más pequeños que estos.
- **Firing (Recocido):** Proceso térmico que tiene como objetivo el contacto de la metalización con el silicio de la célula. De manera que por la parte delantera, la plata y otros componentes (p.ej. plomo) se funden alrededor de 800°C atravesando la capa de nitruro de silicio creando el contacto delantero. Por la parte trasera se genera el llamado BSF (Back Surface Field; tipo: p+) y un eutéctico (aleación de Silicio y Aluminio) como contacto para “extraer” la corriente.
- **Hot Spots (Puntos Calientes):** Defectos sobre las células que se producen por cortocircuitos debido a un mal aislamiento. Si una célula empieza a trabajar en inversa ,debido por ejemplo a la acción de una

grieta, toda la corriente puede pasar por puntos con baja resistencia paralelo, calentando esa zona y deteriorando la célula.

- I_{MP} : Corriente en el punto de máxima potencia.
- I_{SC} : Intensidad que produce el sistema fotovoltaico cuando el voltaje es cero. Es la mayor intensidad que se puede dar trabajando en directa.
- Oblea: Lámina de silicio de pequeño grosor (en torno a 3 décimas).
- Resistencia Serie y Paralelo: Son las resistencias del circuito eléctrico equivalente de una célula.

La resistencia serie simula caídas de tensión dentro de la célula, valores pequeños de resistencia serie equivalen a una alta calidad de la célula. Su efecto es visible en el ensayo de EL a altas polarizaciones.

La resistencia paralelo simula el aislamiento de la célula, cuanto mayor sea mejor será el aislamiento. Su efecto se ve con bajas o muy bajas polarizaciones ($I < 0,1 \times I_{SC}$), va unido también a la existencia de shunts. Se pueden localizar en la célula estos problemas mediante la polarización en inversa en el ensayo de EL o mediante termografía.

- Screen Printing (Serigrafía): Mediante este método se coloca por la cara frontal de la oblea una pintura conductora (plata), creando los fingers, que posteriormente se utilizará como electrodo negativo. Igualmente se realiza en la capa posterior de la oblea cubriéndola completamente, pero en este caso con otro compuesto (plata más aluminio), dando el polo positivo.
- Shunt: Cortocircuito o punto de derivación de corriente que se produce por un fallo en el proceso de fabricación de la célula solar o por una degradación local de la misma que produce una reducción del valor de resistencia paralelo.
- Tabins: Última parte del sistema eléctrico interno del módulo que conectar los buses de las células (conectándolas todas ellas en serie) con la caja de conexiones (donde se encuentran los diodos).
- V_{MP} : Tensión en el punto de máxima potencia.
- V_{OC} : Tensión de trabajo de la célula o módulo con circuito abierto ($I=0$).

Introducción y Objetivos

El desarrollo humano de las últimas décadas ha incrementado la demanda de energía considerablemente, propiciado en gran parte por la revolución industrial en países emergentes. En los cuales se prevé que la demanda energética siga en aumento de forma acelerada durante los próximos años.

En los últimos diez años, se ha realizado un gran desarrollo en la producción de energía de forma renovable, con la intención de dar servicio a este incremento de la demanda y la de producir menos emisiones. La energía fotovoltaica es una de las tecnologías que mayor relevancia puede tener en nuestro país debido principalmente a su situación geográfica.

Resumen:

El presente proyecto se centra en esta tecnología, con la intención de desarrollar un software para el análisis de las medidas de electroluminiscencia (EL) tanto de células como de módulos fotovoltaicos (FV).

A través de la correlación digital de los datos obtenidos en las medidas de electroluminiscencia de células y módulos FV, en distintas configuraciones de tensión y corriente, es posible extraer información relevante sobre el funcionamiento eléctrico del dispositivo FV bajo estudio.

Se trata de desarrollar un tratamiento matemático de las imágenes obtenidas para extraer información espacial de la distribución de distintos parámetros eléctricos característicos de los dispositivos fotovoltaicos (resistencia serie, corriente de saturación, tensiones locales, etc) que afectan directamente al rendimiento final de las células FV, y consecuentemente, al módulo FV donde están localizadas.

El software servirá además para la detección y localización de zonas defectuosas (grietas, fallos en la metalización, zonas aisladas, etc) que presentan gran influencia en la eficiencia final de las células y módulos FV.



Antecedentes

Introducción

El presente proyecto se ha desarrollado durante la realización de prácticas curriculares en el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER). En el cual se planteó la automatización del análisis de las imágenes provenientes de los ensayos de electroluminiscencia mediante la creación de un programa en el entorno de Matlab (*MATrix LABoratory*). Se partió del código previo escrito por el tutor y unos métodos de ensayo ya establecidos

La elección de este programa vino propiciado por:

- ✓ Facilidad de tratamiento de datos matriciales (imágenes provenientes del ensayo de EL).
- ✓ Variedad de formas implementadas para la representación de dichos datos.
- ✓ Herramientas adicionales como Simulink o GUIDE (Graphical User Interface Development Environment), que nos permite la realización de una interfaz gráfica para nuestro software de una manera sencilla.
- ✓ Facilidad de encontrar documentación e información, así como la de resolver problemas de forma online (Matlab Documentation y Matlab File Exchange entre otros).

Ensayo de Electroluminiscencia en Oscuridad

Este procedimiento es aplicable a módulos fotovoltaicos de tecnología de silicio cristalino (mono y multi) y de lámina delgada (silicio amorfo, telurio de cadmio (CdTe), CIS (CuInSe₂) y CIGS (CuInGaSe₂).

El ensayo de electroluminiscencia es un método que nos permite conocer la calidad de una célula fotovoltaica y/o la caracterización de un módulo fotovoltaico debido a que no es una técnica destructiva ni invasiva, fácil de aplicar y relativamente rápida. Una imagen EL precisa se puede capturar en pocos segundos usando altas corrientes de polarización (cerca de los valores de I_{sc}).

La teoría sobre EL se puede resumir como la radiación emitida debido a los efectos de recombinación en las células detectadas con una cámara sensible. La intensidad EL depende exponencialmente de la diferencia de energía del par electrón-hueco (nivel Fermi).

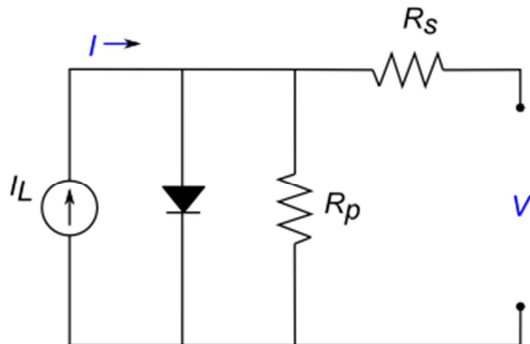


Fig 1: Circuito equivalente de célula solar.

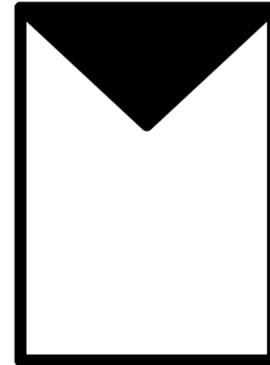


Fig 2: Símbolo de célula o panel solar.

Una de las propiedades más importantes de una célula solar observables con imágenes de EL es la resistencia en serie locales (R_s). Tiene una influencia significativa en el Fill-Factor y por lo tanto sobre la eficiencia. El origen de los altos valores de R_s provenientes del ensayo I - V no se encuentran por lo general uniformemente distribuidos. La formación de problemas de contacto en el proceso de firing, los fingers rotos o las malas propiedades de la pasta de serigrafía causa un aumentó local de los valores de R_s . Los mapas R_s permiten identificar posibles causas y optimizar estos procesos en la producción.

Otros parámetros de funcionamiento como la tensión de polarización y la corriente también pueden ser obtenidos mediante este ensayo. Además nos permite localizar fácilmente la presencia de grietas o daños en la metalización.

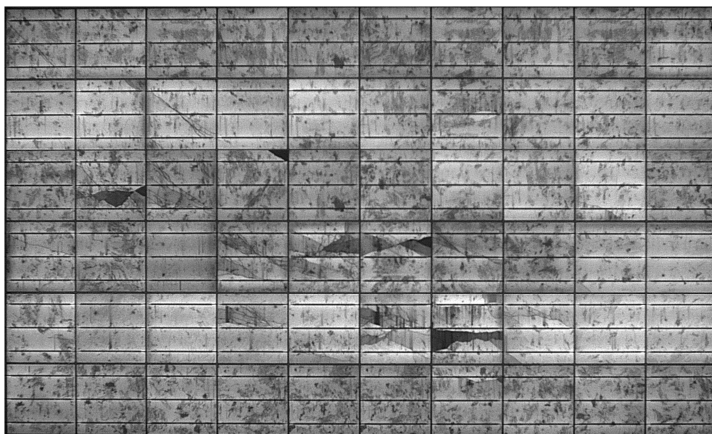


Fig 3: Imagen EL alta polarización.

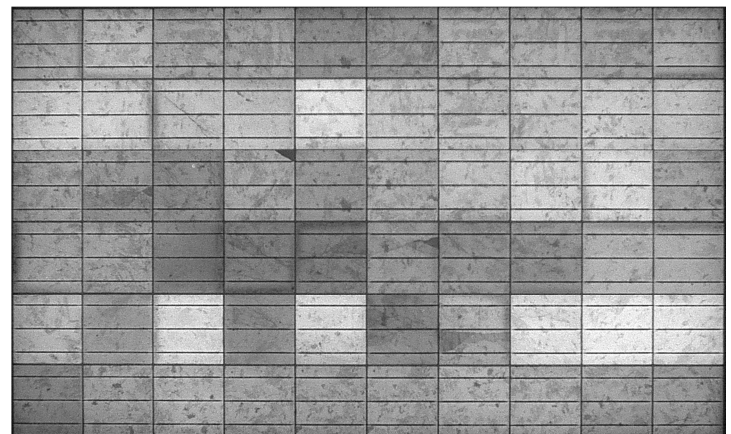


Fig 4: Imagen EL baja polarización.



Fig 5: Imagen EL de un panel solar tras el DHT.

La humedad ha penetrado en el panel y ha empezado a dañar la metalización de las células, oxidándolo.

Fundamentos Teóricos del ensayo de EL

La teoría, conceptos y ecuaciones provienen principalmente del artículo: *Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control*. (Anexo). Que son las principales ecuaciones implementadas en el software.

La emisión EL de cada punto en el módulo presenta una dependencia logarítmica con tensión local de este punto en concreto. Siendo $\Phi(x)$ la emisión local de EL, $V(x)$ el voltaje en cada punto de la célula, V_T una constante térmica referente al voltaje (utilizaremos un valor fijo de 25 mV), y $C(x)$ el factor de calibración constante para el sistema, que está relacionado con las propiedades ópticas y materiales del módulo FV y el sistema de la cámara.

$$\Phi(x) = C(x) \exp\left(\frac{V(x)}{V_T}\right), \text{ para } V(x) \gg V_T \quad (1)$$

El factor de calibración local $C(x)$ puede ser calculado experimentalmente en una imagen de EL bajo condiciones de baja intensidad.

$$C = \sqrt[N_{Cell}]{\frac{\prod_{i=1}^{N_{Cell}} \Phi^i(x_{max}^i)}{\exp\left(-\frac{V_{mod}}{V_T}\right)}}, \text{ para } I < 0.1 \times I_{SC} \quad (2)$$

La resistencia del módulo puede ser calculada de forma aproximada en el caso en el que no se conociese. Generalmente este valor se obtiene del ensayo previo para la obtención de la curva I - V .

$$R_{mod} = \frac{V_{mod} - \sum_{i=1}^{N_{Cell}} V_T \ln\left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C}\right)}{I} \quad (3)$$

Por último, la resistencia en serie externa de cada célula se puede aproximar asumiendo que todas las células en el módulo tienen el mismo valor.

$$R_{ext}^i = \frac{R_{mod}}{N_{Cell}} \quad (4)$$

El voltaje de operación de cada célula se obtiene de la siguiente fórmula, que viene a decir que el voltaje de operación es proporcional a la luminosidad del punto más brillante de la célula más la caída de tensión debido a la resistencia externa. En altas polarizaciones, el píxel más luminoso se encontrará muy cerca del bus, debido a que el efecto de R_s es prácticamente despreciable en esta zona.

$$V_{op}^i = V_T \cdot \ln\left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C}\right) + \frac{R_{mod}}{N_{Cell}} \cdot I \quad (5)$$

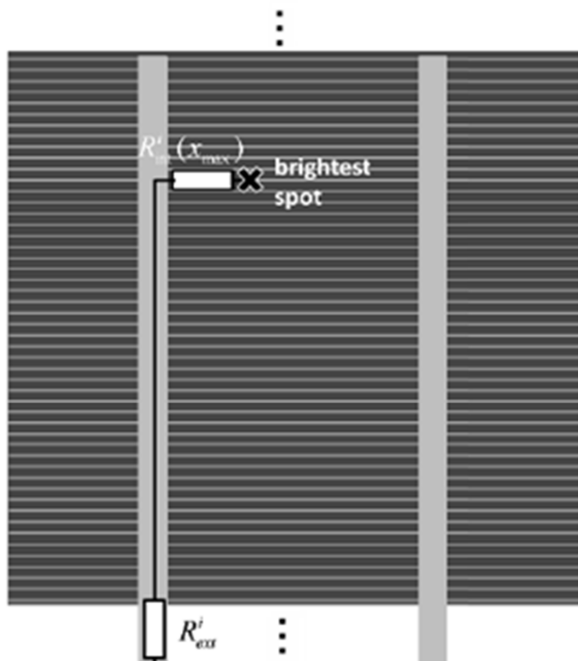


Fig 6: Esquema de una célula solar, con buses Verticales (2) y fingers horizontales.

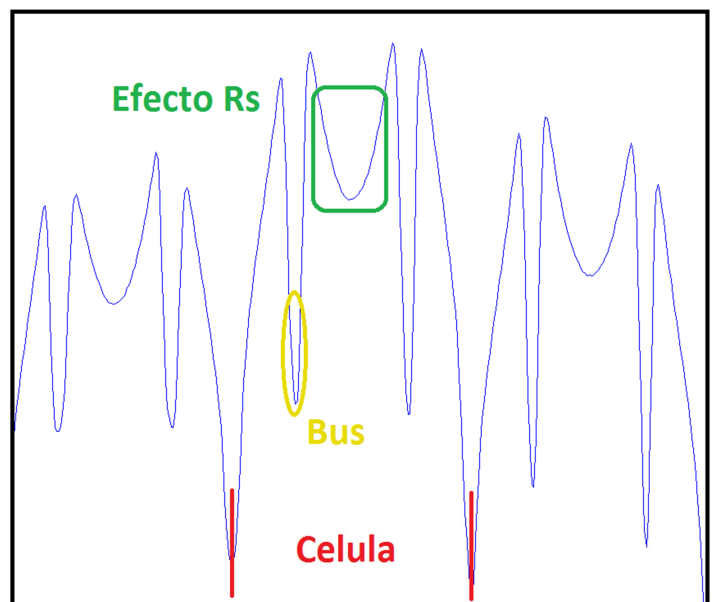


Fig 7: Efecto de la resistencia R_s en la Intensidad lumínica emitida (y por lo tanto en el voltaje de ese punto).

En la figura 7, podemos observar la luminiscencia en un módulo monocristalino con dos buses por célula (polarizado con intensidad cercana a la I_{SC}). Se ve claramente que los puntos más alejados de los buses son los que menor intensidad tienen, debido al efecto de la resistencia serie de la célula. Otro efecto que habrá que tener en cuenta es que puntos que deberían estar completamente oscuros, como los espacio entre células y buses, quedan iluminados por el contorno.

Metodología del ensayo de EL

Previo al comienzo del ensayo, se comprueba que el módulo se encuentra limpio y completamente seco antes de iniciar la prueba (Especialmente si ha sido sometido a ensayos previos). En caso de que no sea así se procederá a su limpieza con un paño y agua destilada o desmineralizada.

El ensayo de EL comienza con la captura de al menos dos imágenes de la célula o módulo fotovoltaico a distintas polarizaciones. Las capturas deben hacerse sin ningún tipo de cambio en la disposición del sistema, ya que para el posterior análisis numérico es completamente imprescindible la correlación de píxeles entre las imágenes. Sin esta perfecta correlación, el resultado quedaría falseado o directamente nulo e inservible.

Para la captura de las imágenes es necesaria una completa oscuridad que no interfiera en la medida del ensayo. Para ello se realiza en un cuarto oscuro especial, diseñado para este propósito, con todas las superficies negras para evitar reflejos que puedan incidir sobre el sistema bajo estudio. Cuando el ensayo se realiza a baja polarización, el tiempo de captura de la imagen puede ser considerable, incluso superior a los diez minutos para observar ciertas características como la resistencia paralelo (R_p).

El sistema de captura utilizado es una cámara de Si-CCD, el chip de captura de esta cámara (1344x1024 píxeles de resolución) es sensible a la radiación infrarroja (NIR) en la cual emite el silicio de la célula o panel fotovoltaico. La longitud de onda se encuentra entorno a los 1100 nm para la mayoría de sistemas fotovoltaicos. Además el objetivo óptico va en consonancia con la cámara, proporcionando una alta transmitancia en el rango de longitud de onda del infrarrojo cercano para maximizar la radiación capturada por la cámara. Adicionalmente se ha incorporado un filtro paso largo en el objetivo, con la intención de reducir la captura del espectro visible. Ello permite omitir un paso en el que se resta el “fondo” a cada imagen para eliminar el ruido, y de esta manera reducir el tiempo de captura a la mitad.

Fig 8: Curva de transmitancia del filtro en función de la longitud de onda.

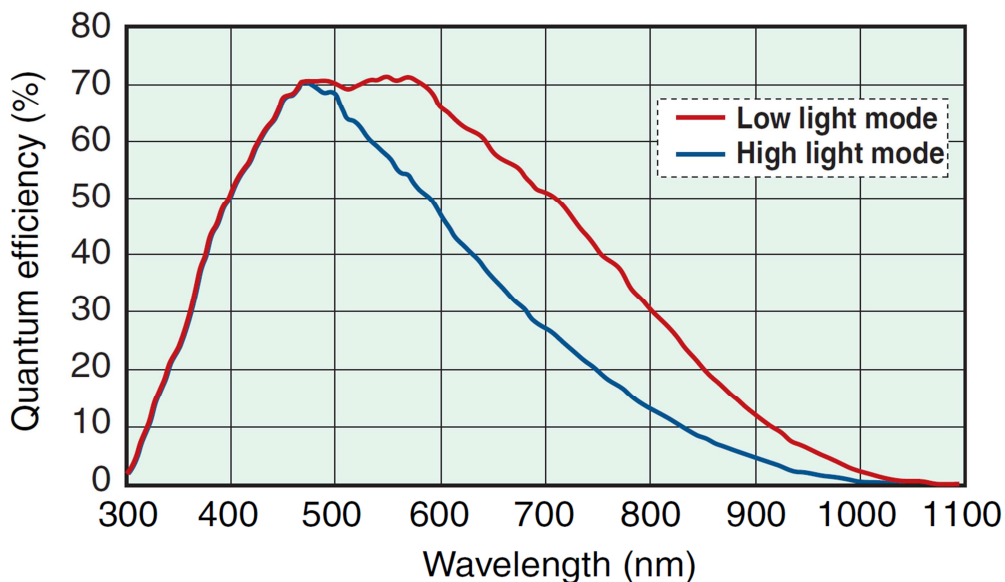
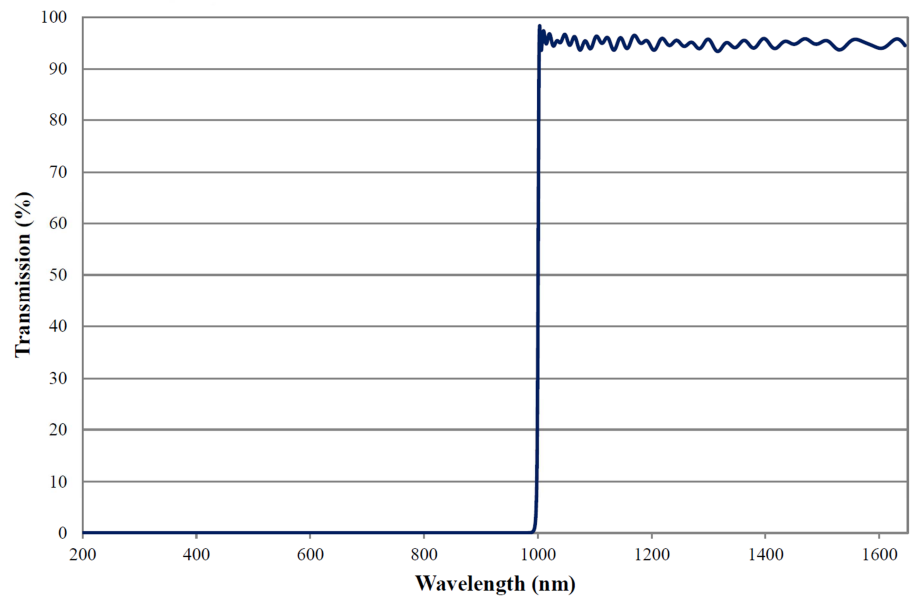


Fig 9: Respuesta espectral de la cámara utilizada.

Como podemos observar en la imagen superior, la sensibilidad de la cámara en la longitud de onda que nos interesa (~1100 nm) es muy limitada en comparación con el espectro visible. Esta es una de las razones por las cuales el ensayo de EL debe realizarse en oscuridad. La acción conjunta de la cámara y el filtro nos permite por un lado, homogeneizar la sensibilidad en la captura, y por otro lado, filtrar el espectro infrarrojo emitido por todo cuerpo por el hecho de estar a cierta temperatura.

Por último mencionar la necesidad de un objetivo gran angular para la captura de paneles solares completos, ya que debido a su tamaño es difícil que la cámara lo abarque completamente si el ensayo se realiza en lugares cerrados como es el caso.

Proceso del ensayo de EL

Para la medición de EL, se conecta la cámara a un ordenador para que mediante el software *HCImage Live*, podamos controlar y configurar todos los parámetros necesarios para realizar una correcta medición.

Se comprueba que la conexión eléctrica sirve para polarizar el módulo en directa. Para ello se enciende la fuente y se comprueba que la tensión crece por encima de $V_{OC}/5$ cuando la corriente es superior a $I_{MP}/10$. Si al aumentar la corriente, la tensión apenas crece y se mantiene en torno a 2V, el módulo estará polarizado en inversa (la corriente circulará por los diodos de paso).

El primer paso a seguir es la colocación de la cámara de manera que toda la célula o panel fotovoltaico entre en la imagen. Pero más importante es la maximización de la zona de captura para perder la mínima resolución posible, porque partimos ya de una resolución muy ajustada. Además es necesario que el objeto este completamente perpendicular al objetivo de la cámara y por supuesto centrado. Si la disposición del sistema no fuese perpendicular causaría por un lado que la imagen estuviese desenfocada en algunas zonas, y por otro que la densidad de píxeles no fuese homogénea.

El segundo paso necesario es el de enfocar perfectamente la imagen. Hay que tener en cuenta que si enfocamos con luz visible en la habitación, al hacer la medida de EL la imagen se encontrará desenfocada. Para realizar correctamente este paso, es necesario aplicar una corriente al modulo fotovoltaico (valores cercanos a la I_{SC} nos facilitará el proceso) y que empiece a emitir radiación infrarroja. La ayuda del filtro mencionado antes nos permite que el enfoque se pueda realizar con luz ambiental sin que la captura sature (imagen completamente blanca) y no podamos ver nada. Como el tiempo de captura para poder observar algo puede ser de aproximadamente dos segundos, es necesario esperar a que la imagen se refresque para realizar un nuevo reenfoque.

El tercer paso es la captura de al menos dos imágenes de EL a distintas polarizaciones. Generalmente se obtendrán sólo dos imágenes, una con una corriente cercana a la I_{SC} y otra al 10% de esta intensidad. En la primera de ellas se podrá ver el efecto de la resistencia serie en las células, y en la otra este efecto no se dará debido a la baja intensidad. La elección de realizar una medida al 10% de la I_{SC} y no menor, se debe a que todavía no aparecen los efectos de la resistencia paralelo, y por lo tanto las células estarán homogéneamente iluminadas.

El cuarto paso es la exportación de los datos de captura para el posterior análisis en el software desarrollado. Se exporta a un libro excel (*.xls) en el cual se encontrará el nivel de intensidad lumínica de cada pixel. Debido a las dimensiones de la imagen, los datos se encontrarán en varias hojas distintas del excel, y por lo tanto habrá que tenerlo en cuenta a la hora de importar el archivo. Otra posibilidad es la de guardar la imagen en formato *.tiff, ya que no se utiliza ningún tipo de compresión y por lo tanto los datos permanecen intactos.

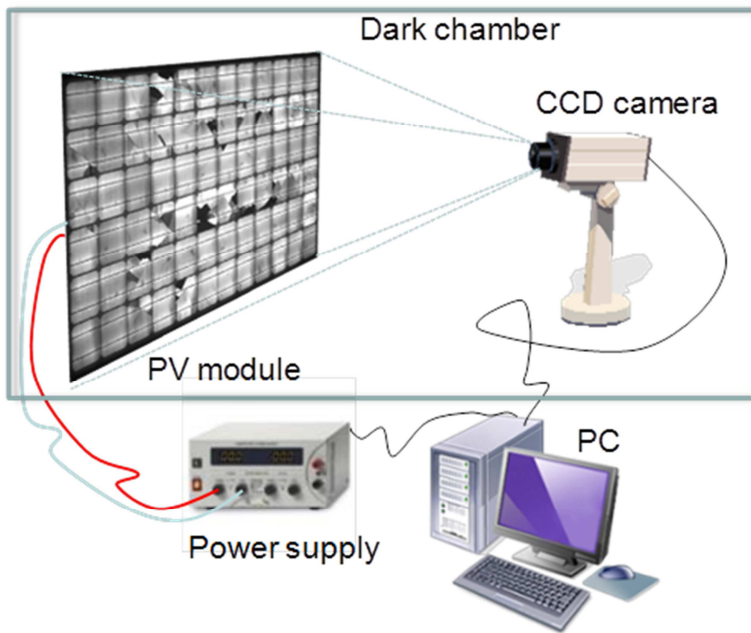


Fig 10: Esquema del sistema de captura instalado en el cuarto oscuro.

Los archivos generados en la captura tendrán todos el siguiente formato (Fig 11) a excepción de la extensión. Posteriormente podremos extraer información necesaria para el análisis de forma automática del nombre del archivo, y así agilizar la importación de información desde el programa desarrollado.

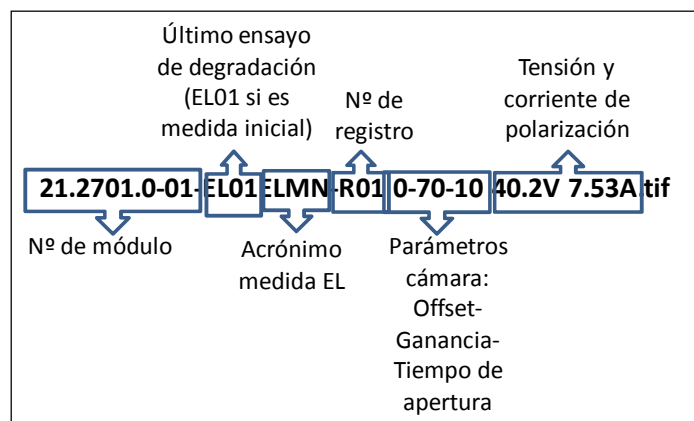


Fig 11: Nomenclatura de los archivos del ensayo de EL.

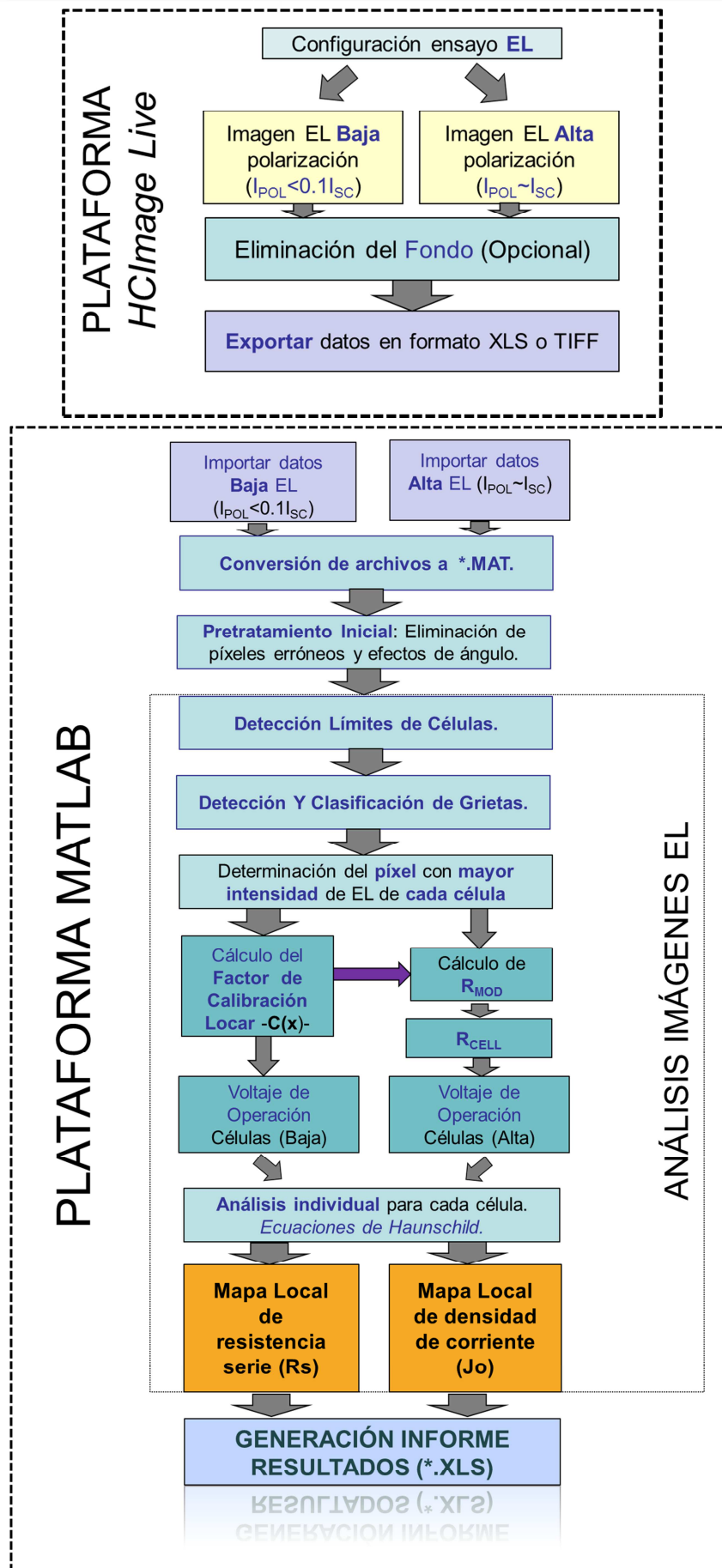


Fig 12: Diagrama del proceso general a realizar.

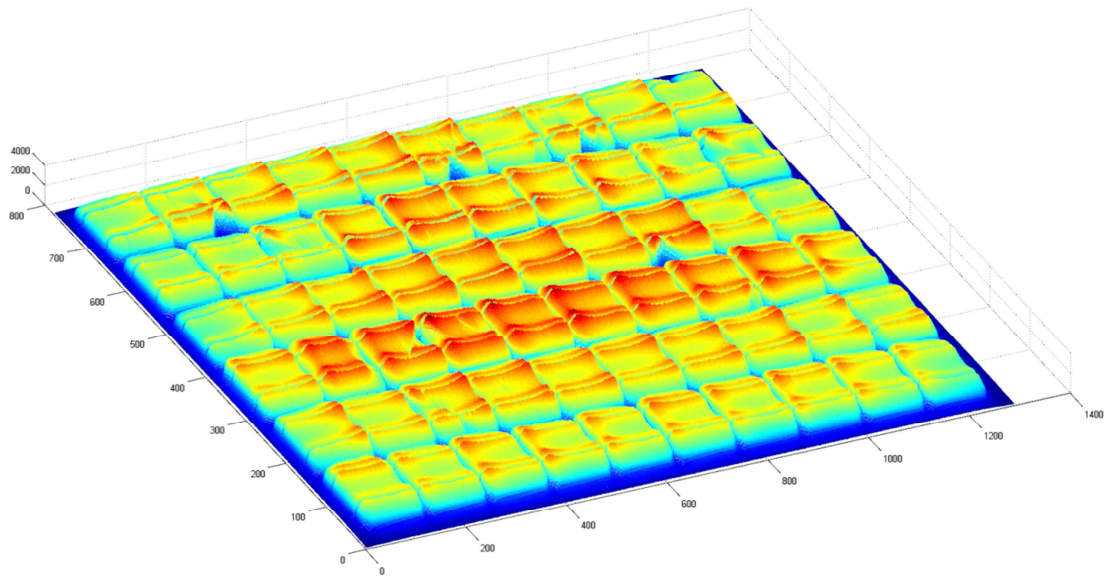


Fig 13: Gráfico 3D de intensidad lumínica emitida por un panel monocristalino con dos buses por célula.

Resultados de Ejecución

Introducción.

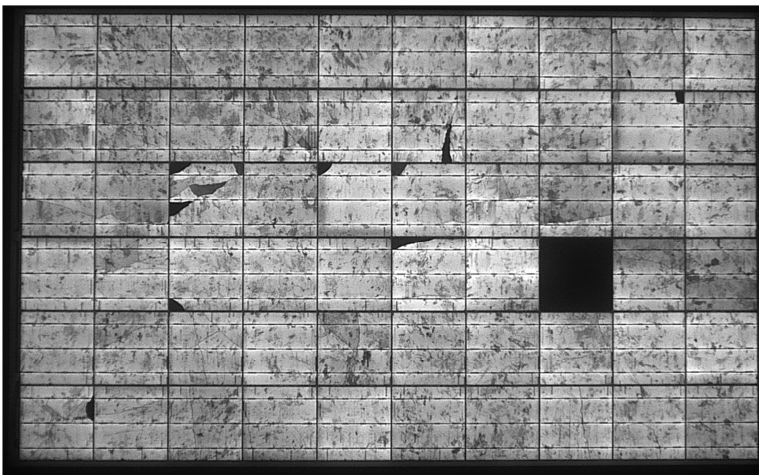
Se van a presentar los resultados obtenidos por el programa para el análisis de dos casos reales, un módulo y una célula fotovoltaica. Cada uno de ellos analizado con su respectivo subprograma (Imágenes ya corregidas).

Módulo Fotovoltaico.

Datos de Partida

Partimos de las dos imágenes de ensayo de EL y los datos de polarización. La R_S total del módulo es desconocida (se aproximará durante la ejecución del programa). En este ejemplo no se utilizó el filtro para la captura, por lo que se procedió a restar el “fondo” a la imagen para reducir el ruido. Las imágenes fueron exportadas en formato Excel, convertidas a *.mat y corregidas antes del análisis propiamente dicho.

- Imagen Alta Polarización.



Offset: 0

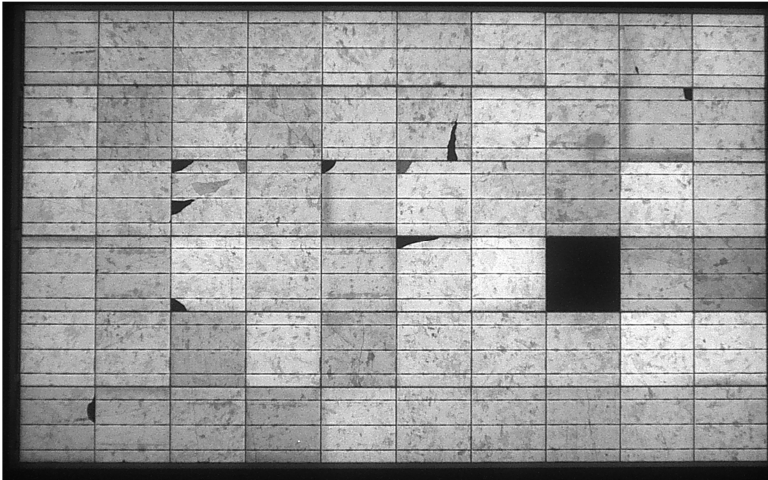
Ganancia: 70

Tiempo Exposición: 6 s

Tensión Polarización: 40.1 V

Intensidad Polarización: 7.8 A

- Imagen Baja Polarización



Offset: 0

Ganancia: 70

Tiempo Exposición: 60 s

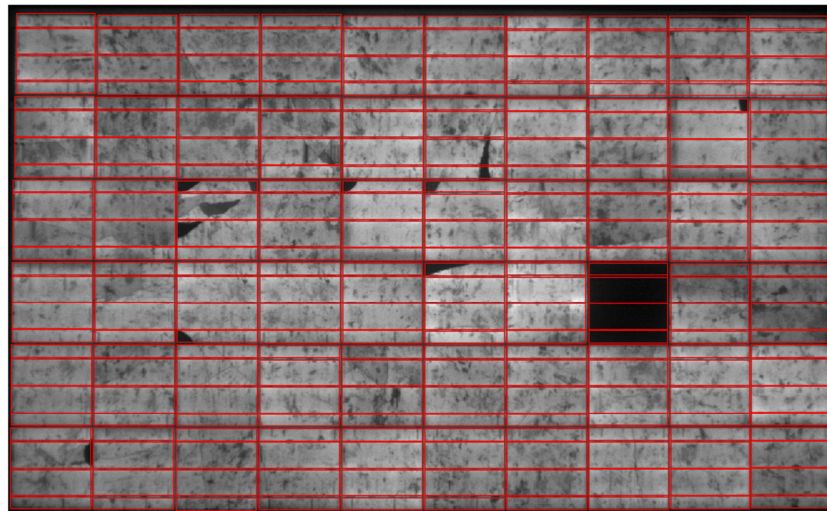
Tensión Polarización: 32.6 V

Intensidad Polarización: 0.7 A

Resultados

El primer paso es la localización y delimitación de las células en las imágenes de EL. El resultado obtenido es el siguiente, detectados también la posición de los buses en cada célula.

Límites de las Células



Una vez localizadas las células, se obtiene el píxel más luminoso de cada una de ellas, y se calculan los voltajes de operación de forma aproximada. La caída de tensión sólo en los cables desde la fuente de alimentación hasta las conexiones externas del módulo es superior a un voltio, así que los voltajes de operación estarán sobreestimados.

Tensión de polarización (mV) de cada célula; Vpol módulo=40.1V

670	666	667	666	671	672	673	672	668	672
671	668	669	672	675	673	672	671	672	667
668	669	672	671	675	674	676	671	672	670
669	670	674	673	673	677	680	647	671	661
665	667	669	672	669	671	671	673	673	675
666	666	663	669	672	669	667	671	668	665

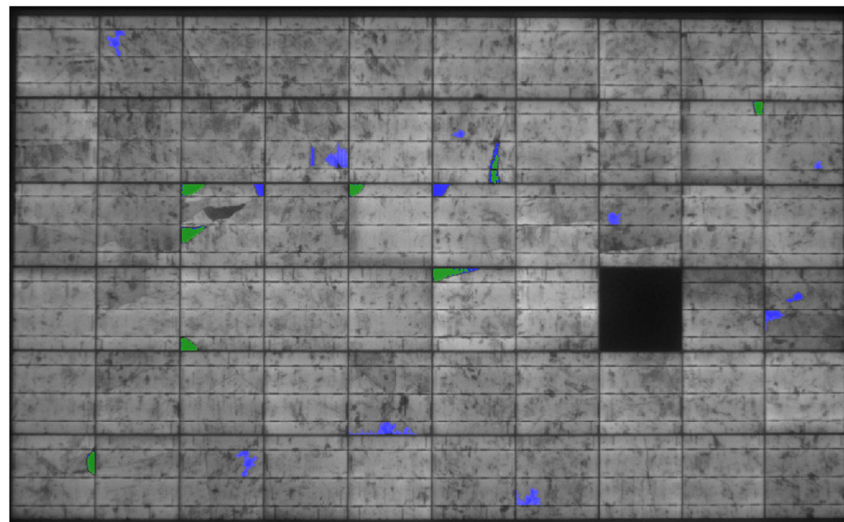
Tensión de polarización (mV) de cada célula; Vpol módulo=32.6V

543	545	548	549	551	550	551	551	550	552
547	544	551	548	552	550	554	550	548	549
550	548	551	550	551	554	553	546	555	552
546	547	554	552	550	554	557	483	548	542
548	548	545	552	546	552	553	551	556	554
541	543	544	544	551	549	548	546	548	547

En el caso de la célula oscura, el voltaje de operación posiblemente sea mucho menor al calculado por el programa. Al quedar iluminada por las células adyacentes, el voltaje queda falseado. Si midiésemos el voltaje de esa célula, sólo mediríamos la caída de tensión en buses y resistencia de contacto.

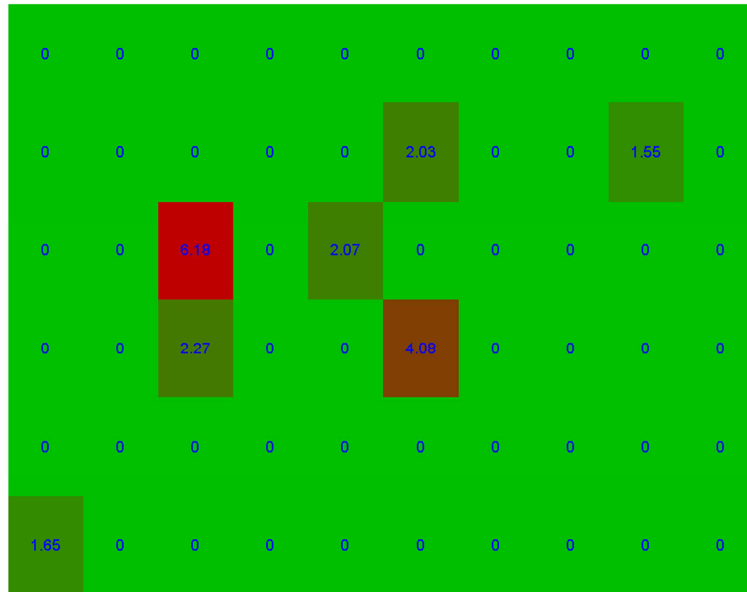
Posteriormente se localizan y clasifican las grietas. Este proceso tiene un tiempo de ejecución considerable, encontrándose por lo general entre 1 minuto y 3, pero pudiendo ser superior a los 5.

Grietas B: Azul ----- Grietas C: Verde



Una vez localizadas las grietas, el proceso de cuantificación es inmediato. En la siguiente figura se obtienen los valores en porcentaje de área, dispuestos de la misma forma que el módulo original. Conociendo el porcentaje de área de cada célula y su posición, podemos determinar la pérdida de potencia total del módulo.

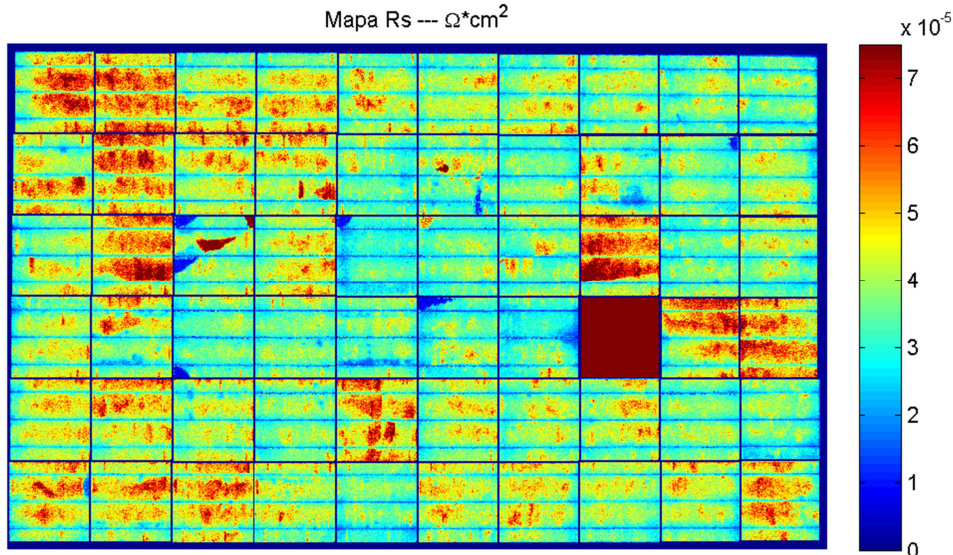
Porcentaje de área grietas C



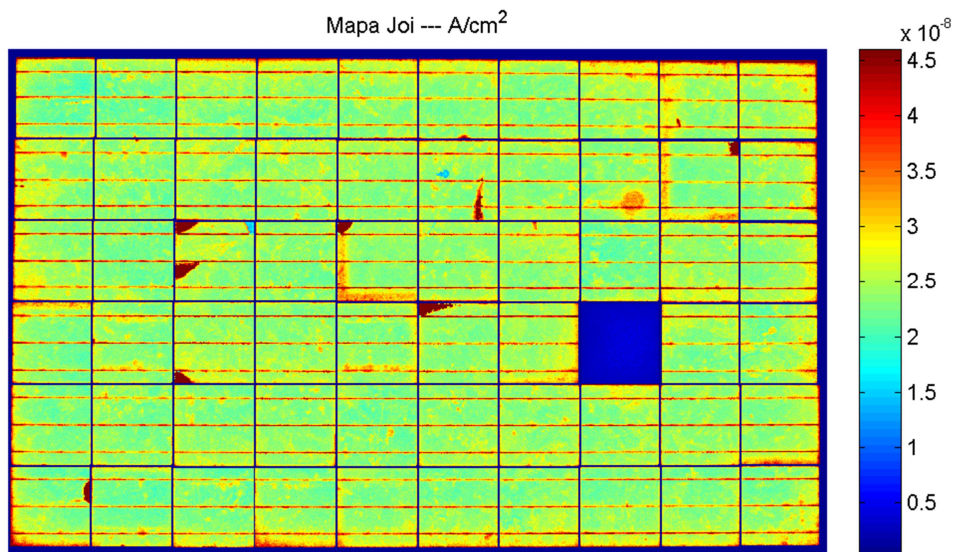
Por último se obtienen los mapas de R_s y J_{oi} al aplicar las fórmulas mencionadas en el apartado “Fundamentos Teóricos del ensayo de EL”.

El mapa de R_s nos muestra las zonas donde peor conductividad tienen las células, produciendo una caída de tensión y por tanto una pérdida de potencia. Se puede apreciar que las grietas tipo B producen un aumento de la resistencia serie, sin embargo las grietas tipo C no aparecen en esta mapa debido a que son zonas aisladas. También producen una pérdida de potencia pero por otros motivos, que podríamos calcular.

Mapa R_s --- $\Omega \cdot \text{cm}^2$



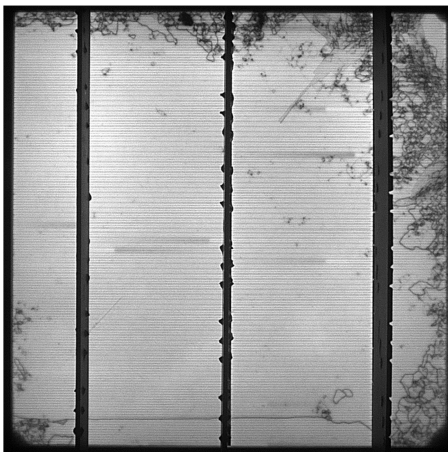
El mapa de Joi nos indica la calidad del sustrato de la célula, cuanto más bajo sea mejor calidad. Tiene especial interés en laboratorio aplicado a células, donde se pueden ver otro tipo de defectos inapreciables a simple vista.



Célula Fotovoltaica.

Datos de Partida

Imagen Alta Polarización



Offset: 0

Ganancia: 70

Tiempo Exposición: 20 s

Tensión Polarización: 635 mV

Intensidad de Polarización: 7 A

Fotografía

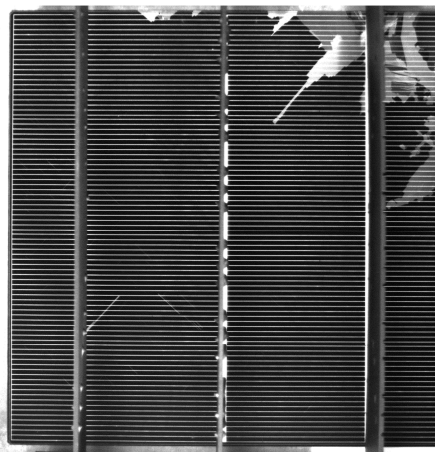


Imagen Baja Polarización



Offset: 0

Ganancia: 70

Tiempo Exposición: 300 s

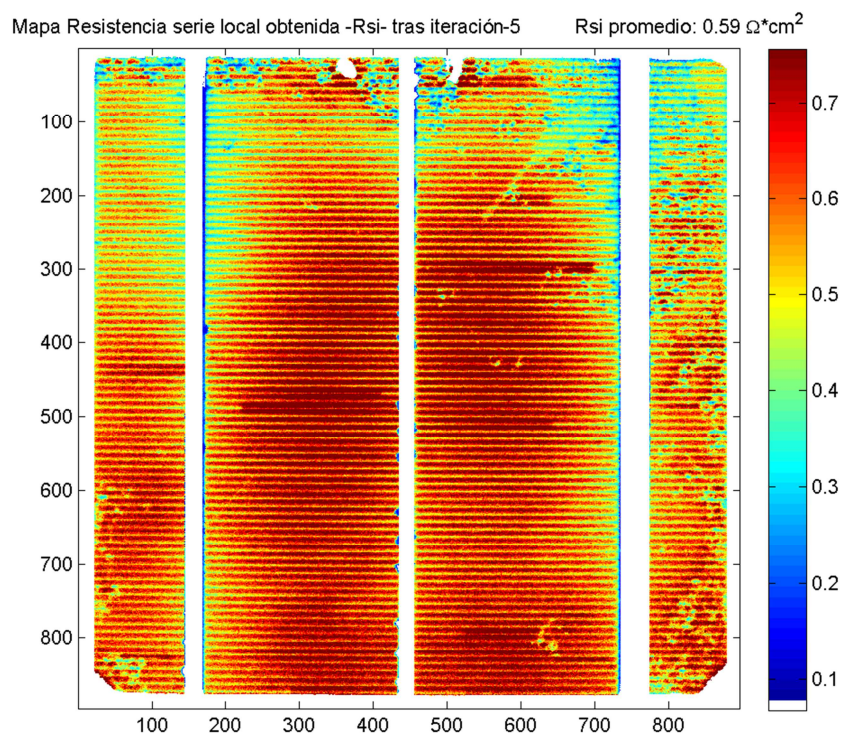
Tensión Polarización: 527 mV

Intensidad de Polarización: 0.80 A

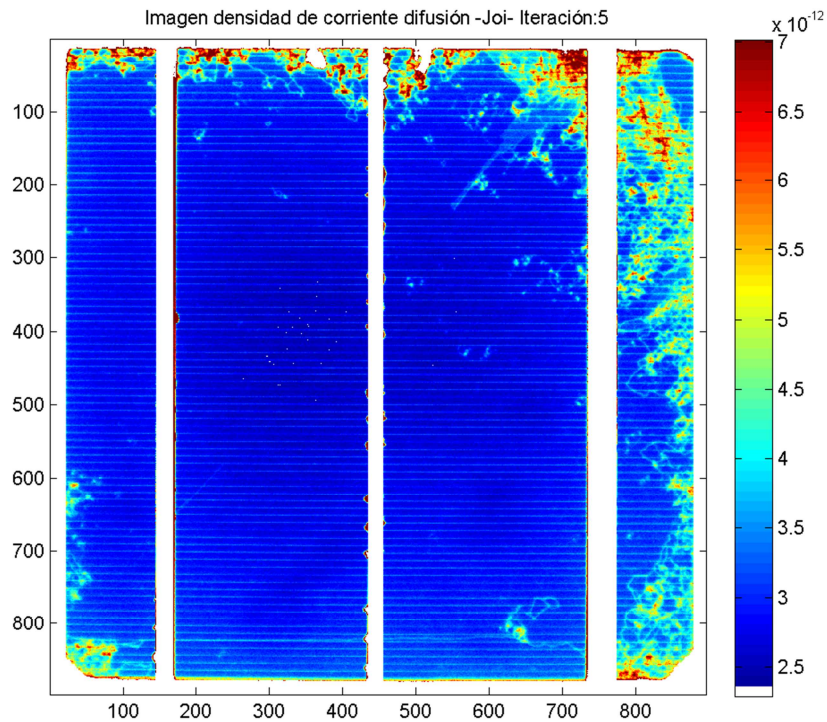
Resultados

Los resultados obtenidos son los mapas de R_s y J_{oi} . El resto de resultados que se obtienen en la ejecución del programa para módulos no es de aplicación en este caso. El voltaje de operación es el elegido por nosotros. Debido a que se toman muestras para estudio de propiedades y calidad de los materiales, no debe haber ningún tipo de grieta para hacer el estudio y por tanto la detección de grietas y cuantificación no procede.

En el mapa de resistencia serie, se puede apreciar que cuanto más alejado se está de los buses (3 franjas blancas verticales), aumenta el valor de la resistencia. Esto se debe a que la corriente debe recorrer un mayor trayecto, y es un efecto esperado en todo tipo de células. Las líneas rojas más intensas que se encuentran en disposición horizontal son debidas a la presencia de fingers rotos, generalmente producidos por una mala aplicación de la pasta conductora en el proceso de serigrafía.



En el mapa de densidad de corriente podemos ver que la zona superior y la derecha tiene una peor calidad. El ensayo nos permite localizar las zonas que contienen una mayor concentración de impurezas y que pueden disminuir las propiedades de la célula. En este caso la tensión de ruptura (en polarización inversa) puede reducirse notablemente, dependiendo de la concentración de impurezas y de la zona afectada.



Otra Información de Interés.

Los resultados obtenidos de la ejecución del programa se guardan de diferentes formas. La primera de ellas son las imágenes *.png que hemos visto, y con las cuales se genera un informe que sirve de registro. También se guardan estas mismas imágenes en formato *.fig, que nos permite cambiar las escalas, colores y perspectiva de las imágenes. Y por último tenemos el archivo *.mat que contiene todos los datos numéricos generados representados en las imágenes y alguno más.



Análisis de Resultados y Validación

Introducción.

El propósito de este software es el análisis de paneles y células fotovoltaicas tanto a nivel de laboratorio (cuantificar la calidad del objeto bajo examen) como a nivel de industria (control de calidad de la producción y aceptación de lotes). Para ello es necesario comprobar que los resultados obtenidos del software son correctos y válidos.

Se han realizado dos ensayos fácilmente medibles para comprobar los resultados y compararlos con la realidad. El primero de ellos es el cambio de sensibilidad de la cámara en toda la zona de captura. Y el segundo es la comprobación de las tensiones de polarización de las células.

Otras pequeñas comprobaciones, como el cálculo del área de las células que se encuentran afectadas por grietas del tipo C, también se realizaron en su momento comparándolas con datos obtenidos de forma manual. No se encontraron anomalías reseñables en la ejecución del programa y se les dio el visto bueno.

Calibración Cámara

Apartado Teórico.

Siguiendo el apartado de tratamiento de imágenes del artículo “Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control”, vamos a comprobar el efecto del ángulo en la captura de imágenes en nuestra cámara.

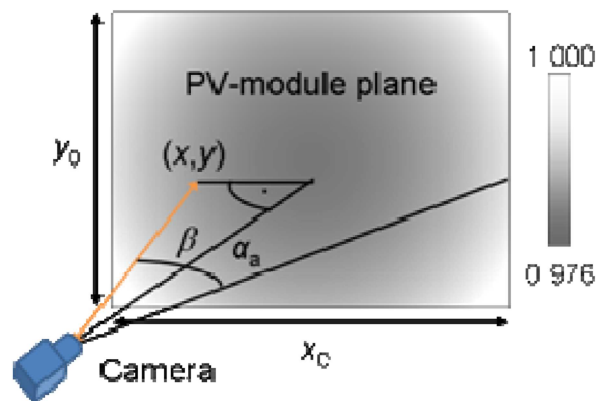


Fig 14: Efecto del ángulo en la sensibilidad de captura.

El primer paso es la medición del ángulo total de captura de nuestra cámara (influenciado por el objetivo utilizado y por la presencia del filtro) y conocer la resolución de la cámara.

$$\alpha_a = 19,55^\circ$$

Resolución Horizontal = 1344 píxeles

Resolución Vertical = 1024 píxeles

$$k(x, y) = \sqrt{1 + \tan(\alpha_a) \cdot \frac{\left(x - \frac{x_0}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_0}{2}\right)^2}{\frac{x_0}{2}}}$$

La matriz de calibración que multiplicará a la obtenida en el ensayo de EL es la siguiente (Sólo válida para nuestro sistema de cámara, objetivo y filtro):

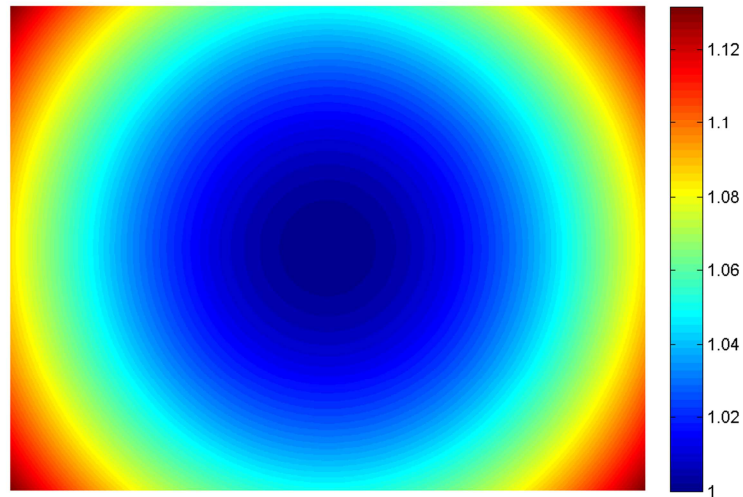


Fig 15: Matriz de corrección para nuestra cámara.

Apartado Práctico.

Para comprobar el apartado teórico se van a realizar medidas de EL de una única célula. Situaremos la célula en la zona central, que cogeremos como referencia, e iremos desplazando la célula y realizando la misma medida una y otra vez hasta recorrer toda la zona de captura de la cámara. El resultado obtenido en este ensayo es el siguiente.

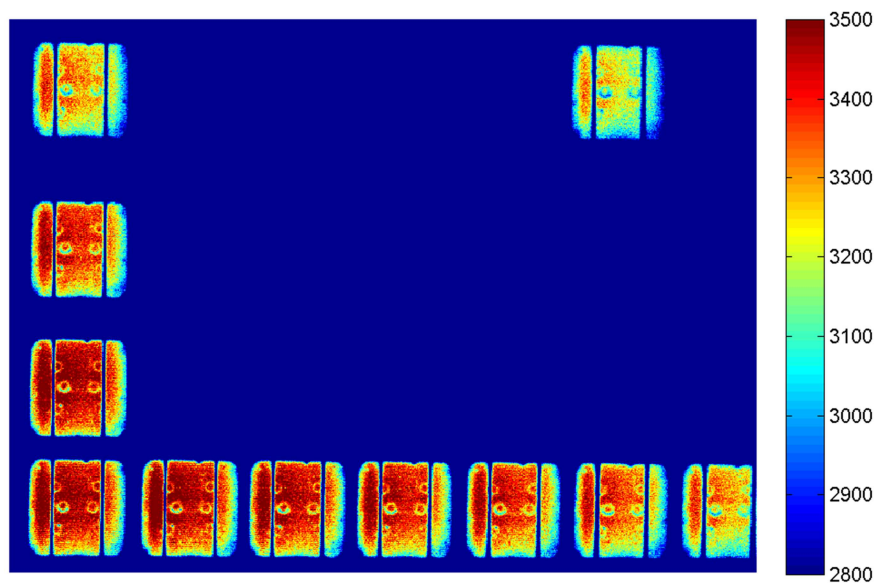


Fig 16: Cuadrante superior derecho de la zona de captura de la cámara.

Se observa a simple vista que la intensidad percibida por la cámara es menor cuanto más alejado se está del centro (parte inferior izquierda de la imagen). Siendo muy apreciable en la dirección diagonal.

Para realizar el cálculo numérico de este efecto, se ha seleccionado una pequeña región del centro de la célula para comprobar su variación con la distancia al centro de la imagen. Para ello se ha dejado la célula fotovoltaica polarizada durante un periodo de 15 minutos para que se caliente y se estabilice. De esta forma evitamos que el voltaje de la célula cambie por los efectos de la temperatura, y por tanto varíe la luminosidad.

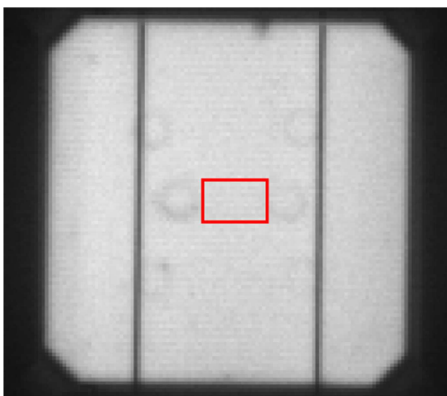


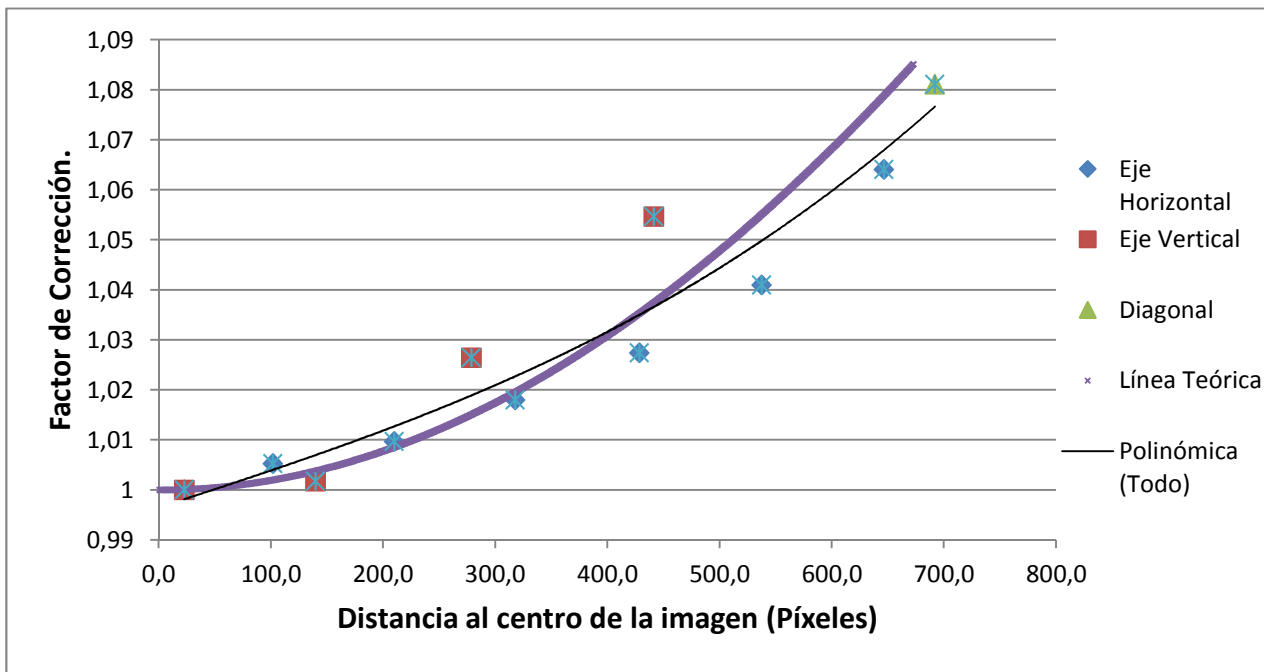
Fig 17: Región utilizada para el cálculo numérico.

Dimensiones de 19x13 píxeles.

Apuntamos la posición de la esquina izquierda de la región a examinar, así como las dimensiones. Con esta información podemos hallar el centro de la región y su distancia (en píxeles) al centro de la imagen.

La relación con el centro se ha tomado respecto a la medida más cercana al centro, no está exactamente en el centro pero sí muy cercano.

Nombre Célula.	Esquina Superior Izquierda ROI	Pixel Hor.	Pixel Vert.	Dist. Centro	Intensidad media	Relación con el centro
Centrada	649 487	-13,5	-18,5	22,9	3453	1
H1	763 488	100,5	-17,5	102,0	3435	1,005240175
H2	872 489	209,5	-16,5	210,1	3420	1,009649123
H3	980 489	317,5	-16,5	317,9	3392	1,017983491
H4	1091 490	428,5	-15,5	428,8	3361	1,027372806
H5	1200 491	537,5	-14,5	537,7	3317	1,041000904
H6	1309 491	646,5	-14,5	646,7	3245	1,064098613
V1	651 366	-11,5	-139,5	140,0	3447	1,001740644
V2	651 227	-11,5	-278,5	278,7	3364	1,026456599
V3	652 64	-10,5	-441,5	441,6	3274	1,054673183
D1	1198 67	535,5	-438,5	692,1	3194	1,081089543



Se observa que el efecto del ángulo en la dirección vertical es algo superior al eje horizontal. Sin embargo, el dato obtenido en la diagonal, se asemeja más a la tendencia del eje horizontal. Ello nos hace pensar que el efecto en el eje vertical, aunque mayor, puede estar sobredimensionado por la forma manual y relativamente poco precisa de tomar los datos. Además de no estar relacionado exactamente con el centro de la imagen.

Se ha decidido tomar la matriz del apartado teórico para la corrección de imágenes al asemejarse a la curva de tendencia obtenida manualmente. De cualquier forma íbamos a mejorar la medida respecto a la de sin corregir.

Validación Tensiones.

Vamos a validar los resultados de voltaje de operación de las células. Para ello vamos a centrarnos en sólo 4 células para poder ser más exactos con las medidas (ver imagen siguiente). El módulo fotovoltaico que vamos a utilizar para las pruebas, está abierto por la parte posterior para tener acceso a los buses de las células y así poder medir el voltaje de operación de cada una por separado.

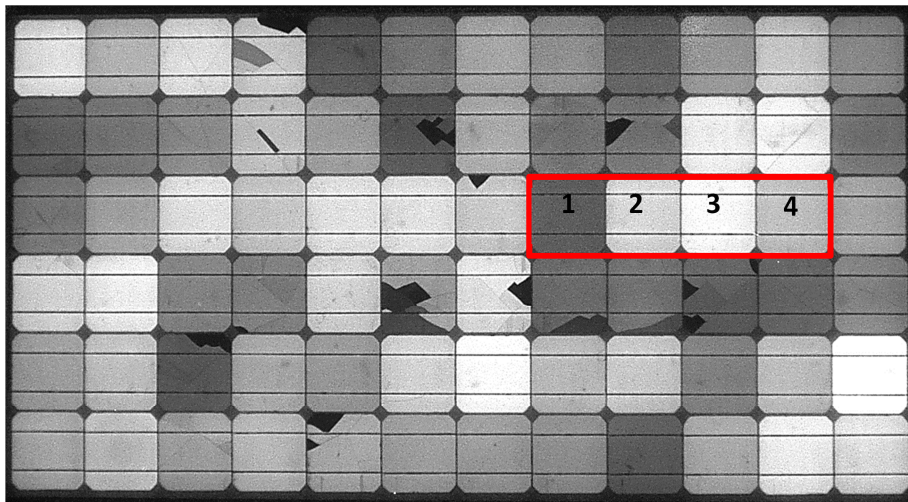
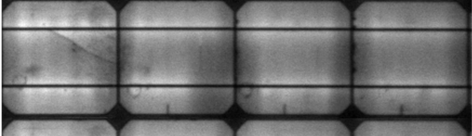
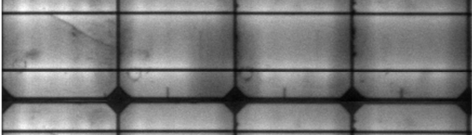
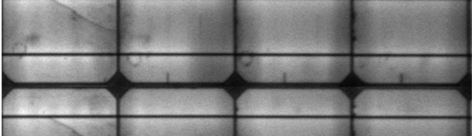
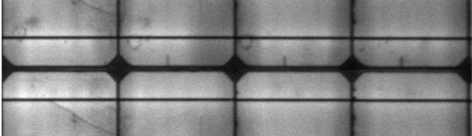
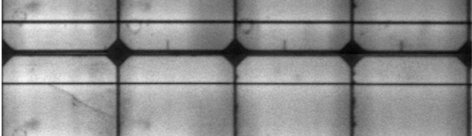
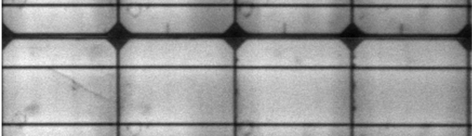
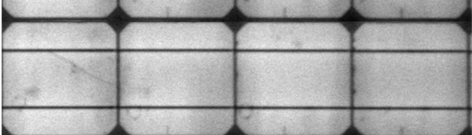
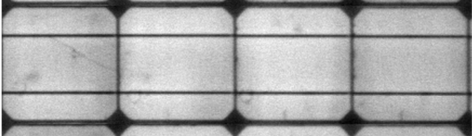
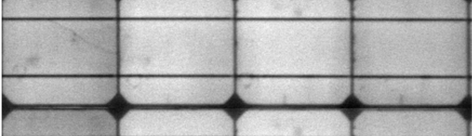
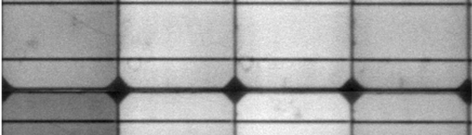
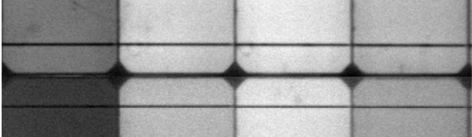
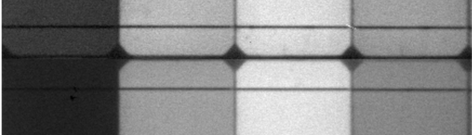
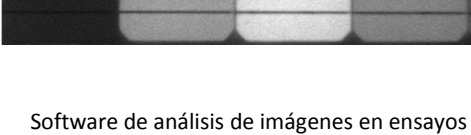


Fig 18: Células utilizadas para la realización del ensayo.

Realizamos el ensayo de EL a varias polarizaciones desde 8 hasta 0,1 amperios. Compararemos los voltajes que obtenemos al analizar las imágenes con los medidos mediante un multímetro.

Para ajustar el voltaje calculado a bajas y muy bajas polarizaciones, utilizaremos el punto más iluminado de cada célula, menos el 25 o 30% de la media de luminiscencia del módulo. Siguiendo las indicaciones del artículo mencionado anteriormente. La idea que hay detrás de esta acción es que, las zonas que deberían tener un valor de luminosidad de 0 pueden tener una luminosidad considerable (>600 sobre 4095), es una forma de normalizar la imagen a su valor real.

	A	mV			
	8	675,5	668,4	670	664,4
	7	665,4	658,7	660,3	655,3
	6	654,8	649,3	650,4	645,8
	5	642,9	638,5	639,4	635,6
	4	630,7	627,1	627,9	624,6
	3	615,1	612,8	613,5	610,5
	2	594,8	594,4	595,2	592,5
	1,5	580,1	581	581,9	578,8
	1	562,7	566,4	567,5	564,7
	0,8	548,9	553,6	554,8	550,5
	0,6	535,7	543,2	544,9	540,3
	0,4	515,3	528,1	530,6	525,3
	0,2	470,6	498,6	503,7	495,5
	0,1	414,9	465,2	475,3	461,2

Resultados:

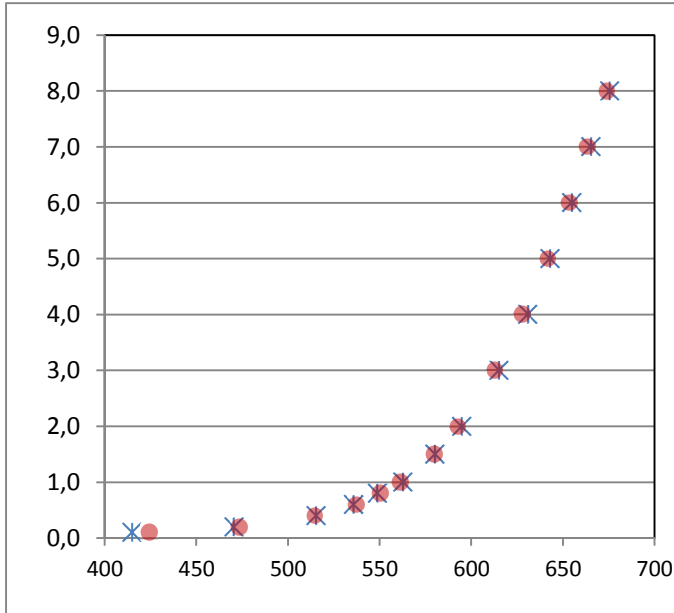
Corriente (A)	Tensión medida (mV)					Tensión simulada (mV)				
	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Suma	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Suma
8,0	675,5	668,4	670	664,4	2678,3	673,8	670,6	667,9	665,7	2678
7,0	665,4	658,7	660,3	655,3	2639,7	663,4	659,8	658,4	655,8	2637,4
6,0	654,8	649,3	650,4	645,8	2600,3	653,5	649,4	647,5	644,9	2595,3
5,0	642,9	638,5	639,4	635,6	2556,4	641,7	637,8	636,3	633,3	2549,1
4,0	630,7	627,1	627,9	624,6	2510,3	627,8	626	623,2	620,5	2497,5
3,0	615,1	612,8	613,5	610,5	2451,9	612,7	610,2	608,8	606,1	2437,8
2,0	594,8	594,4	595,2	592,5	2376,9	592,7	591	590	588,2	2361,9
1,5	580,1	581	581,9	578,8	2321,8	579,8	579,1	578,7	575,6	2313,2
1,0	562,7	566,4	567,5	564,7	2261,3	561,2	562,7	562,6	559,5	2246
0,8	548,9	553,6	554,8	550,5	2207,8	550,5	553,8	554,5	550,6	2209,4
0,6	535,7	543,2	544,9	540,3	2164,1	537,2	542,6	544	539,9	2163,7
0,4	515,3	528,1	530,6	525,3	2099,3	514,7	526,9	528,4	524,2	2094,2
0,2	470,6	498,6	503,7	495,5	1968,4	473,5	499,4	503,6	495,7	1972,2
0,1	414,9	465,2	475,3	461,2	1816,6	424,4	475,1	485,4	470,5	1855,4

Corriente (A)	V simulada - V medida (mV)					V simulada - V medida (%)				
	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Suma	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Suma
8,0	-1,7	2,2	-2,1	1,3	-0,3	-0,25	0,33	-0,31	0,20	0,0
7,0	-2	1,1	-1,9	0,5	-2,3	-0,30	0,17	-0,29	0,08	-0,1
6,0	-1,3	0,1	-2,9	-0,9	-5,0	-0,20	0,02	-0,45	-0,14	-0,2
5,0	-1,2	-0,7	-3,1	-2,3	-7,3	-0,19	-0,11	-0,48	-0,36	-0,3
4,0	-2,9	-1,1	-4,7	-4,1	-12,8	-0,46	-0,18	-0,75	-0,66	-0,5
3,0	-2,4	-2,6	-4,7	-4,4	-14,1	-0,39	-0,42	-0,77	-0,72	-0,6
2,0	-2,1	-3,4	-5,2	-4,3	-15,0	-0,35	-0,57	-0,87	-0,73	-0,6
1,5	-0,3	-1,9	-3,2	-3,2	-8,6	-0,05	-0,33	-0,55	-0,55	-0,4
1,0	-1,5	-3,7	-4,9	-5,2	-15,3	-0,27	-0,65	-0,86	-0,92	-0,7
0,8	1,6	0,2	-0,3	0,1	1,6	0,29	0,04	-0,05	0,02	0,1
0,6	1,5	-0,6	-0,9	-0,4	-0,4	0,28	-0,11	-0,17	-0,07	0,0
0,4	-0,6	-1,2	-2,2	-1,1	-5,1	-0,12	-0,23	-0,41	-0,21	-0,2
0,2	2,9	0,8	-0,1	0,2	3,8	0,62	0,16	-0,02	0,04	0,2
0,1	9,5	9,9	10,1	9,3	38,8	2,29	2,13	2,12	2,02	2,1

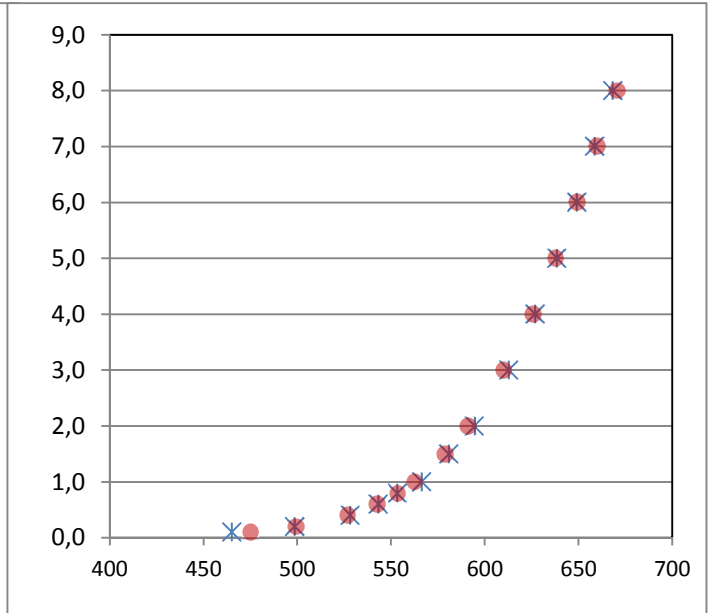
Curvas I-V (A – mV) de las células:

✖ Medida

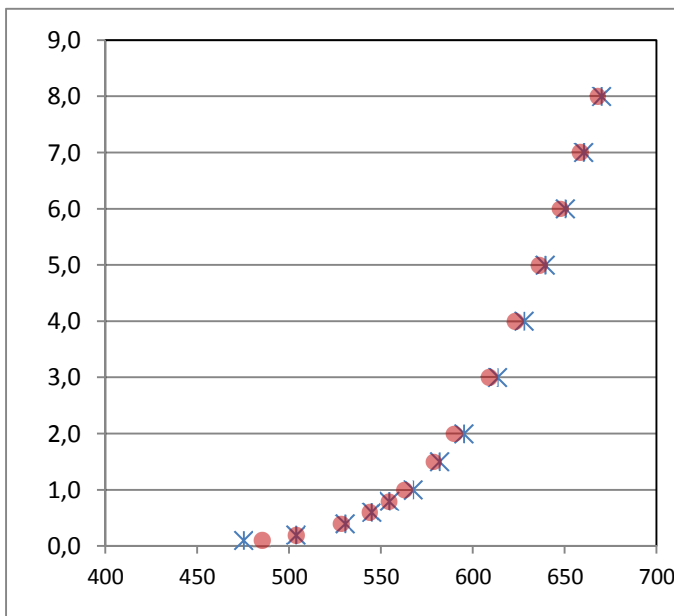
● Calculada



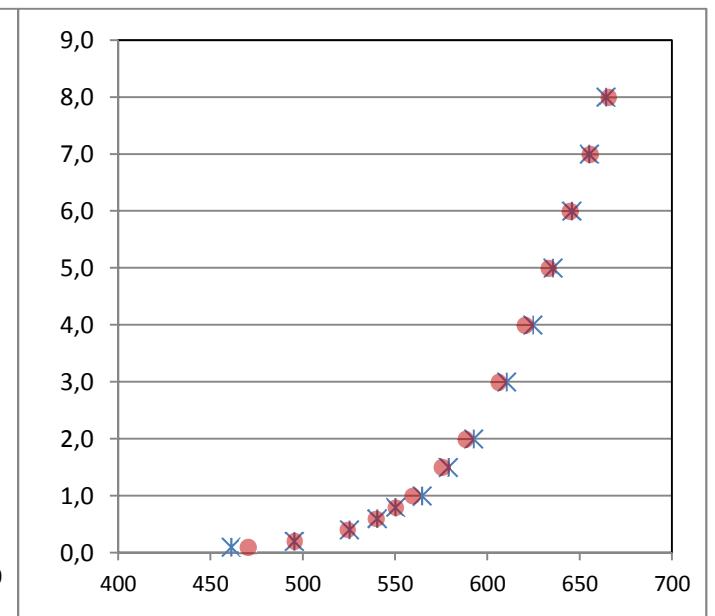
Célula 1



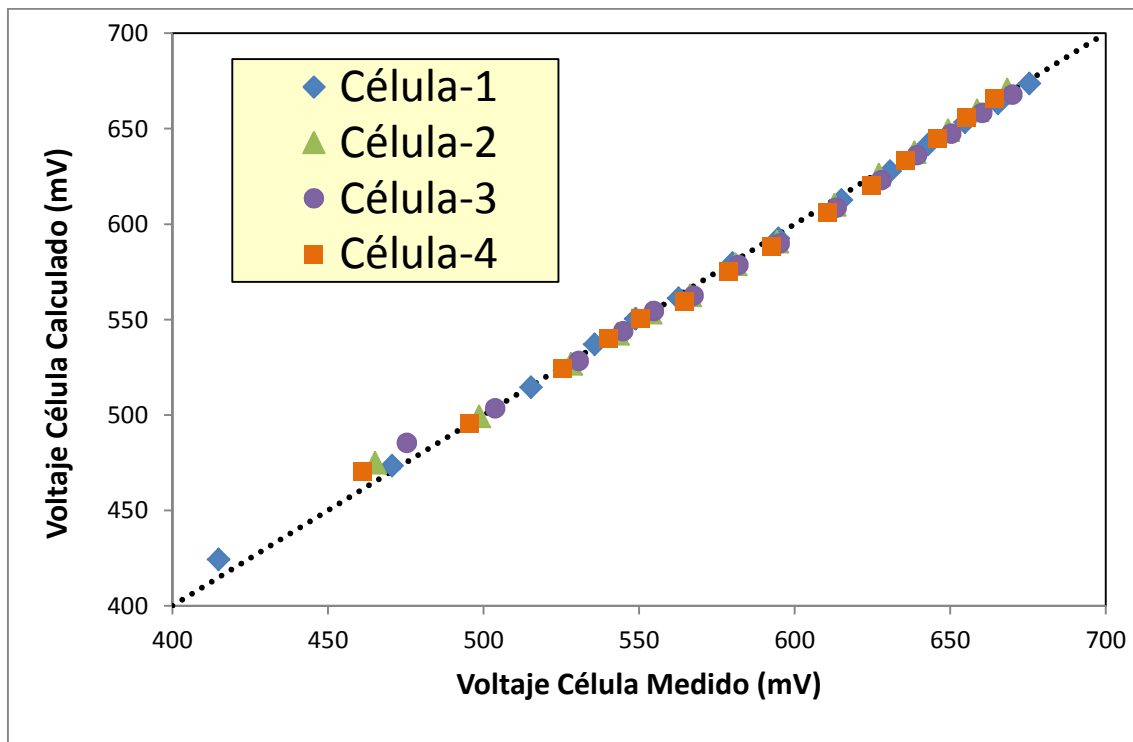
Célula 2



Célula 3



Célula 4



De este ensayo se puede concluir la validez del cálculo de voltaje de operación de las células mediante el ensayo de EL. Sin embargo, cuando las células presentan grietas C de gran tamaño, el resultado difiere del esperado. Pudiendo llegar a oscilaciones de hasta 50 mV (no constantes durante toda la curva I-V). Se pueden deber a los siguientes factores:

- Mayor densidad de corriente circulando por la célula.
- La resistencia de contacto de las células (R_{ext}) deja de estar homogéneamente distribuida.
- Mal aislamiento de las células debido a las grietas (R_p).
- Oscilaciones en la temperatura de trabajo de las células, que tienen efecto en las propiedades eléctricas del silicio, y por tanto en los voltajes de operación.

Manual de Usuario

1. Instalación

- 1.1. Instalación Matlab.
- 1.2. Archivo *.exe y archivo MCR (Matlab Compiler Runtime).

2. Cómo comenzar.

- 2.1. Archivo Matlab (*.m,*.p).
- 2.2. Archivo *.exe y archivo MCR (Matlab Compiler Runtime).

3. Pantalla de Inicio

- 3.1. Conversión de Archivos.
 - 3.1.1. Excel - Mat
 - 3.1.2. Tiff - Mat
- 3.2. Corrección Imágenes.
- 3.3. Análisis Electroluminiscencia.
 - 3.3.1. Módulo PV.
 - 3.3.2. Célula PV.

4. Análisis Electroluminiscencia - Módulo PV.

- 4.1. Parámetros.

5. Análisis Electroluminiscencia - Célula PV.

6. Exportación Datos y Nomenclatura.

- 6.1. Exportación Datos desde HClmagen Live.
- 6.2. Nomenclatura archivo.
- 6.3. Nomenclatura variables en archivo *.mat.

1. Instalación.

Si fuese el caso, descomprimos el archivo que contiene el programa.

1.1. Archivo Matlab (*.m, *.p).

Si tenemos los archivos nativos de Matlab (más otros archivos necesarios).

Abrimos Matlab y nos situamos en el directorio (carpeta) que contiene el programa.

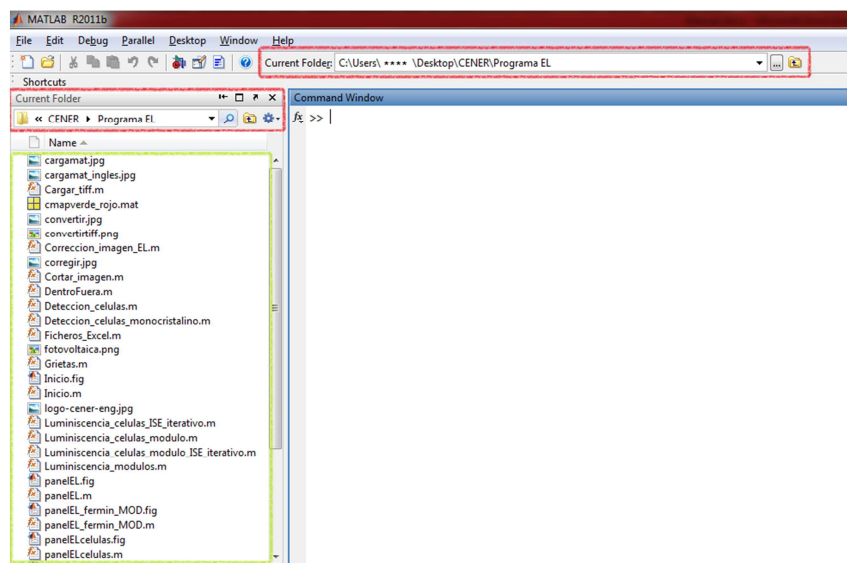


Fig M1: Selección del directorio de trabajo.

En rojo la zona que nos indica el directorio de trabajo actual.

En verde los archivos correspondientes al programa.

1.2. Archivo *.exe y archivo MCR (Matlab Compiler Runtime).

El archivo MCR contiene toda la información de las funciones presentes en Matlab, archivos para ejecutar la interfaz gráfica, etc...

Instalamos este archivo pulsando sobre él y siguiendo las instrucciones.

En el caso de tener instalado Matlab, puede no ser necesario instalar este archivo. Dependiendo de la versión del software, las funciones pueden haber sido modificadas, sustituidas o eliminadas, por lo tanto ante cualquier inconveniente, conviene instalar este archivo.

2. Cómo comenzar.

2.1. Archivo Matlab (*.m, *.p).

Escribir “Inicio” en la ventana de comandos de Matlab para que aparezca la ventana principal del programa y podamos seleccionar las diferentes opciones. Ver figura M2.

A partir de este punto, el proceso es el mismo en las dos opciones.

2.2. Archivo *.exe y archivo MCR (Matlab Compiler Runtime).

Al ejecutar el archivo *.exe saldrá la ventana de “Inicio” al igual que en la imagen anterior. Ver figura 2.

A partir de este punto, el proceso es el mismo en las dos opciones.

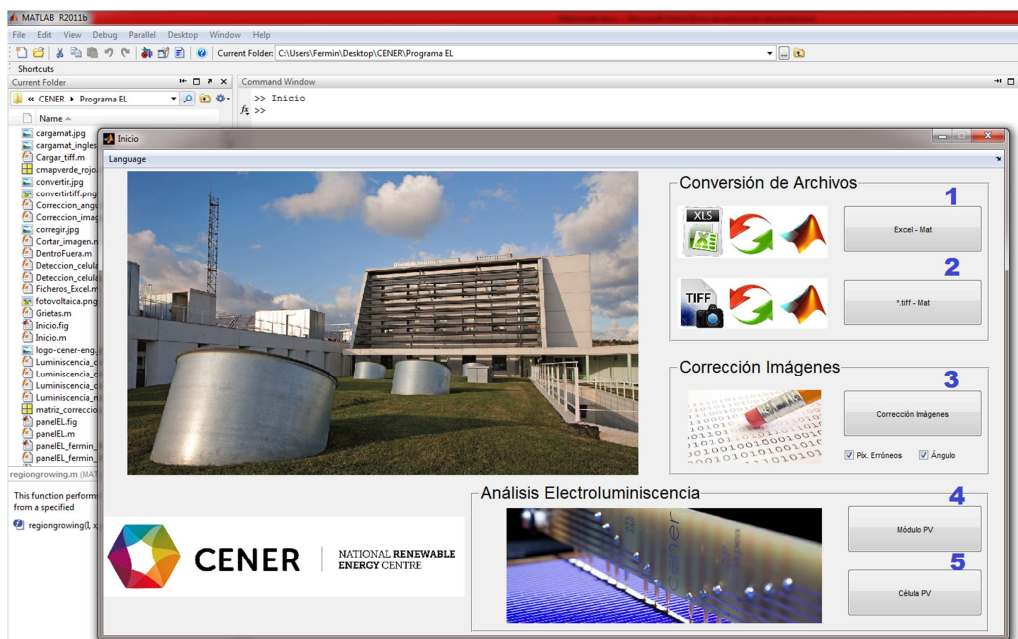


Fig M2: Iniciar el programa.

3. Pantalla de Inicio

3.1. Conversión de Archivos.

3.1.1. Excel - Mat

Se van a convertir los datos (libro Excel) de la captura desde el programa *HCIImage Live* a un archivo *.mat para trabajar con ellos.

Pulsamos el botón “1” (ver Fig M2) y se abrirá una ventana emergente para seleccionar los archivos para la conversión (Uno o múltiples archivos pueden ser tratados a la vez).



El nuevo archivo será guardado en el directorio original de partida, y se mantendrá el archivo Excel.

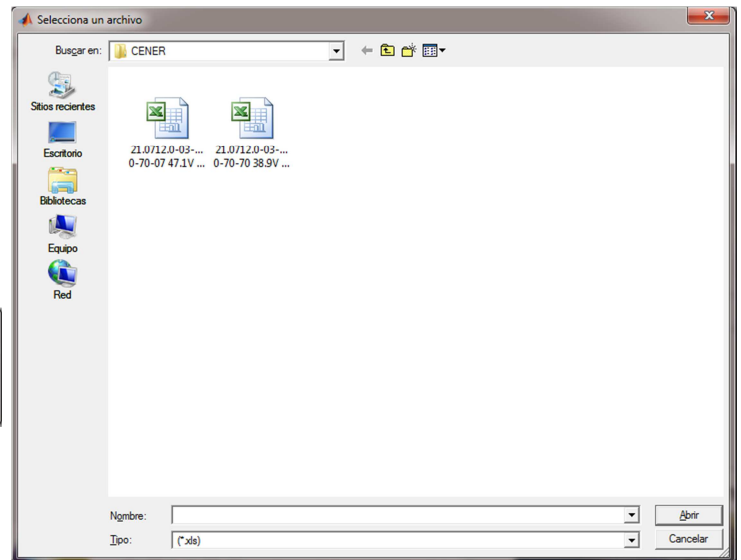
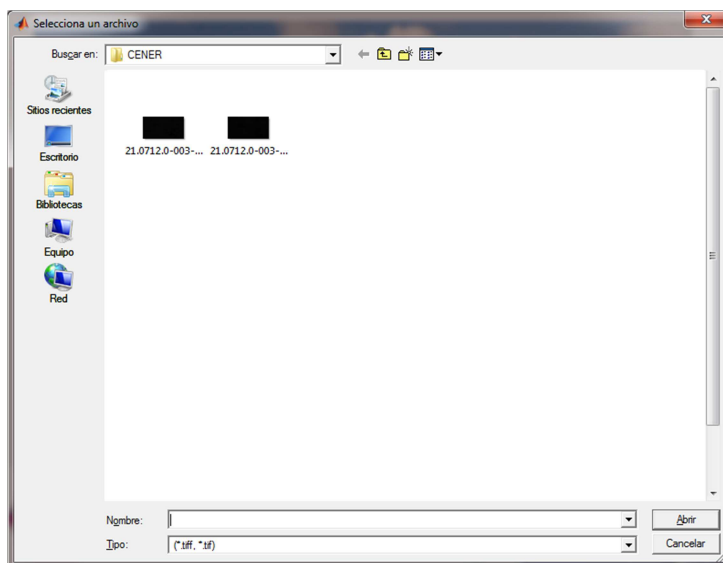


Fig M3: Ventana de selección de archivos *.xls.

3.1.2. Tiff - Mat

Se van a convertir los datos (imagen *.tiff) de la captura desde el programa *HCIImage Live* a un archivo *.mat para trabajar con ellos.



Pulsamos el botón “2” (ver Fig M2) y se abrirá una ventana emergente para seleccionar los archivos para la conversión (Uno o múltiples archivos pueden ser tratados a la vez).

El nuevo archivo será guardado en el directorio original de partida, y se mantendrá la imagen *.tiff.

Fig M4: Ventana de selección de archivos *.tiff.

3.2. Corrección Imágenes.

Las imágenes pueden tener píxeles erróneos, especialmente visibles en capturas con un alto tiempo de exposición. Además, por cuestiones de cálculo, también se eliminarán los ceros en la matriz.

Para ello se eliminan los píxeles más desviados y se hace la interpolación con los más próximos.

Al pulsar el botón “3” (ver Fig M2) se abrirá una ventana para seleccionar los archivos a corregir. El archivo de salida tendrá el mismo nombre que el de entrada, pero con un “0-“ delante.

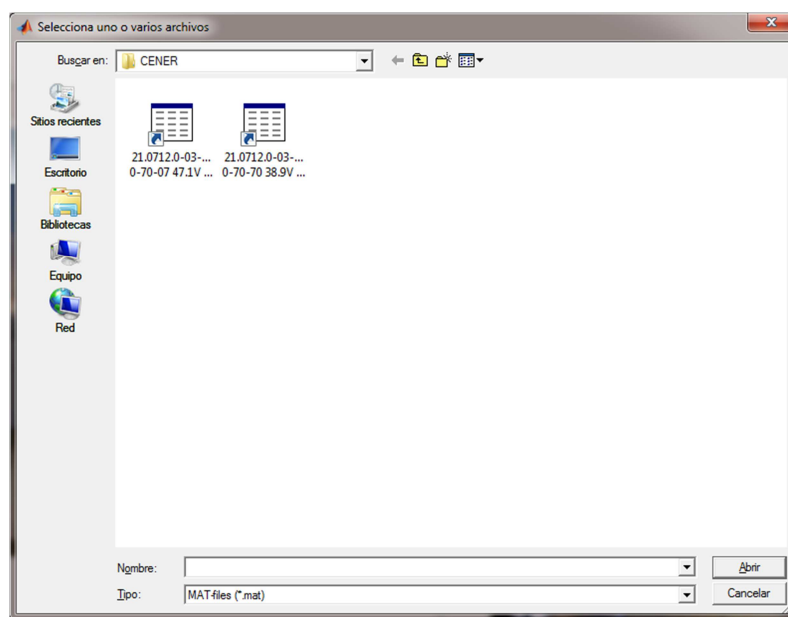


Fig M5: Ventana de selección de archivos *.mat.

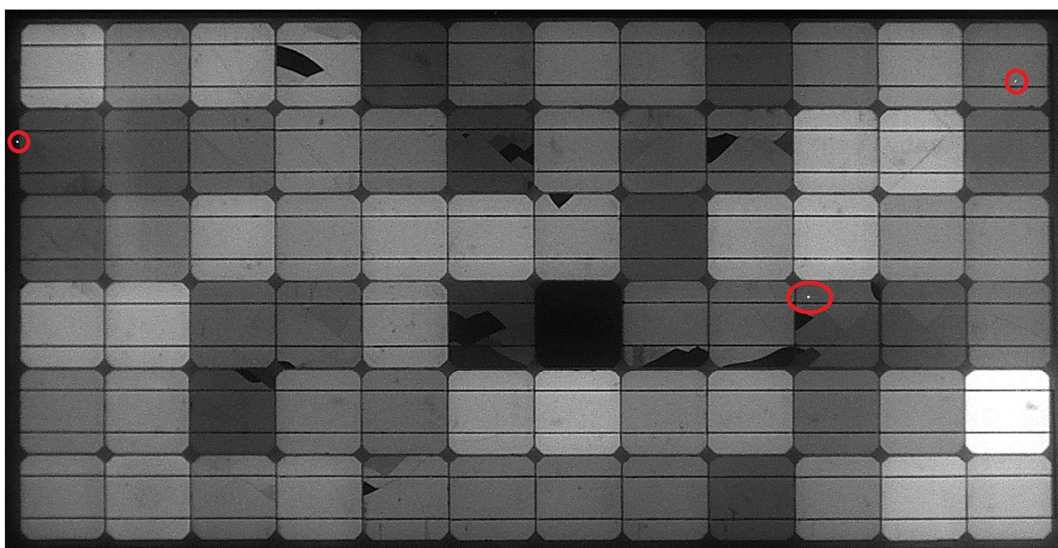


Fig M6: Píxeles erróneos marcados en rojo.

3.3. Análisis Electroluminiscencia.

3.3.1. Módulo PV.

Pulsando el botón “4” (ver Fig M2) abriremos el panel correspondiente al programa para el análisis y tratamiento de imágenes de paneles fotovoltaicos.

Instrucciones de uso en el apartado 4.

3.3.2. Célula PV.

Pulsando el botón “5” (ver Fig M2) abriremos el panel correspondiente al programa para el análisis y tratamiento de imágenes de células fotovoltaicas.

Instrucciones de uso en el apartado 5.

4. Análisis Electroluminiscencia - Módulo PV.



Fig M7: Programa para el análisis de módulos fotovoltaicos (ventana de ajustes en la derecha).

Language: Selección Idioma (Español – Inglés).

Parámetros: Ajustes de ejecución del programa.

Browse: Ventana para carga de archivos.

La carga de los archivos hace que se muestre la imagen tomada en la ventana correspondiente y se autocompleten los campos de Voltaje, Intensidad y Tiempo de Exposición (Siempre que se siga la nomenclatura establecida para los archivos de EL).

R_S es la resistencia del módulo, que puede haber sido obtenida en un ensayo anterior. En el caso de seleccionar “No”, se reescalarán los resultados a “1”.

Nº Filas y Nº Columnas son el número de células del módulo, tendrán un valor típico de 10 y 6 respectivamente.

Número Buses es la cantidad de buses que discurren por cada célula, generalmente 2 o 3.

Semi-cuadrado o cuadrado nos indica la forma de la célula, debido al proceso de fabricación, las células monocristalinas son semi-cuadradas (esquinas cortadas).

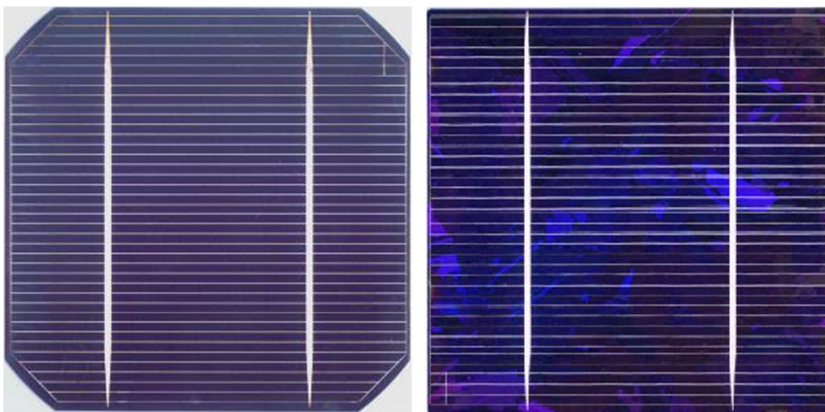


Fig M8: Célula semi-cuadrada a la izquierda y cuadrada en el derecha.

Buses Verticales u Horizontales nos indica la dirección de los buses en la célula, para poder hacer la detección.

Podemos elegir dónde y que guardar de los resultados obtenidos. Por defecto solo se guardarían las imágenes *.png y se generaría un Informe sobre el módulo (libro Excel).

El botón “Ejecutar” dará inicio al programa si se han introducido los valores necesarios.

El botón “Stop” parará la ejecución del programa (puede no ser inmediato), útil si el programa entra en un bucle. Hay que tener en cuenta que el tiempo de ejecución es considerable.

El botón “Cerrar Resultados” nos cerrará las ventanas de resultados que han ido apareciendo en la pantalla durante la ejecución del programa.

4.1. Parámetros.

Espacio entre células: Píxeles de distancia entre las células.

Offset esquinas: Durante la detección de las esquinas en las células semi-cuadradas, podemos elegir ser más o menor restrictivos a la hora de indicar dónde empieza la célula. Un valor mayor indica que el corte de la esquina es algo superior a lo detectado.

Constante grietas C: Sirve para modificar el valor de referencia que se ha tomado para distinguir y clasificar las grietas B y C. Un valor mayor implica detectar más zonas como grietas C en detrimento de las B.

Constante grietas B: Sirve para modificar el valor de referencia que se ha tomado para distinguir y clasificar las grietas B. Puede haberse detectado como grietas B una zona que realmente no es grieta de ningún tipo. Un valor mayor indica que hay más zonas con grietas B.

Offset histograma grietas: El último filtrado de grietas para diferenciar grietas B muy malas y grietas tipo C. Un valor mayor implica mayor presencia de grietas C.

5. Análisis Electroluminiscencia - Célula PV.



Fig M9: Programa para el análisis de células fotovoltaicas.

La misma idea que la aplicada en el apartado 4, pero con menos variables. Algunas de las tareas realizadas en el programa de módulos no son necesarias ahora (detección de grietas, voltaje de operación).

La carga de archivos nos mostrará la imagen de la célula y se autocompletarán varios campos de información (si se ha seguido la nomenclatura establecida).

R_s es la resistencia de la célula, si no se conoce se estimará durante el cálculo.

Nº Iteraciones limita el número de ejecuciones del programa llevadas a cabo. Con polarizaciones diferentes el proceso iterativo no mejora los resultados. Sólo tiene sentido con imágenes tomadas a polarizaciones muy cercanas.

Const. Quitar Buses sirve para eliminar de la imagen los puentes situados encima de la célula para polarizarla. Un valor menor retirará más zonas de la imagen.

Quitar Bordes sirve para eliminar del cálculo del mapa de R_s las esquinas de la célula (células semi-cuadradas).

Estas dos últimas opciones trabajan conjuntamente, “Quitar Bordes” influye en el resultado final de la eliminación de buses.

6. Exportación Datos y Nomenclatura.

6.1. Exportación Datos desde *HCImagen Live*.

Se recomienda la exportación de los datos en formato *.tiff (o su extensión equivalente *.tif) por su mayor velocidad de conversión de datos. Si exportamos en archivo Excel, hay que tener en cuenta que puede cambiar la disposición de los datos entre las diferentes versiones de *HCImage Live*.

6.2. Nomenclatura archivo.

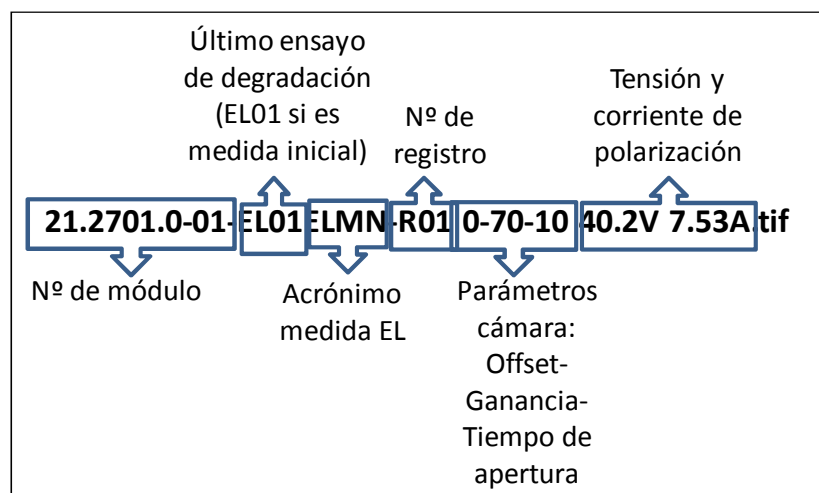


Fig M10: Ejemplo nomenclatura archivos EL.

La nomenclatura del archivo es esencial para poder hacer uso del proceso anotación automática de los datos de polarización de los módulos. Si se siguiese otra nomenclatura, sólo habrá que modificar manualmente las casillas para que el programa funcione con normalidad.

En la generación del informe también se obtienen datos de este nombre.

El valor de “0-70-” sirve como referencia para situarse en el nombre y extraer los demás datos. Si no se siguiese esta nomenclatura, el proceso de autocompletado sería inútil y habría que comprobar los datos insertados.

6.3. Nomenclatura variables en archivo *.mat.

Tras la conversión del archivo Excel o *.tiff a *.mat, la variable contenida en el archivo será “datos1”.

Tras la corrección de la imagen, la variable contenida en el archivo *.mat pasará a llamarse “datos_Vpol1_salida”. Si se quiere corregir por segunda vez las imágenes de EL (p.ej. si anteriormente no hemos seleccionado alguna de las dos opciones de corrección), habrá que modificar la variable contenida en el archivo antes de proceder a la corrección.



Manual de Programador

Introducción.

La siguiente sección del documento pretende ser una guía de apoyo para la posterior modificación del código. Ya sea para implementar nuevas funcionalidades, para configurar parámetros de ejecución o para eliminar errores no detectados hasta la fecha.

Como punto de partida, todas las funciones en las que se divide el programa se encuentran comentadas (anexos en formato digital). A pesar de ello puede ser complicado seguir el procedimiento y entender los pasos que se llevan a cabo. Aquí explicamos los puntos más complicados de entender, poniendo ejemplos e imágenes si fuese necesario.

[cargamat.jpg](#) >-----< [cargamat_ingles.jpg](#)



Fig MP1: Imágenes mostradas en las interfaces de electroluminiscencia para módulos y células antes de cargar los archivos.

Cargar tiff.m

Programa para cargar los archivos *.tiff y pasarlos a un *.mat.

```
20 | %En el caso de que solo seleccionásemos un archivo, se "corrige" la
21 | %variable.
22 - | if iscellstr(FileName)==0
23 - |     num_ficheros=1;
24 - | end

32 - |     S=char(FileName(i));
33 |
34 | %Leemos la ruta de acceso del archivo correspondiente.
35 - | if iscellstr(FileName)==0
36 - |     S=FileName;
37 - | end
38 - | ruta=[PathName S];
```

Si sólo cargamos un archivo, FileName(i) nos devuelve la letra situada en la posición "i" del nombre. En cambio si seleccionamos varios archivos, la variable FileName cambia de estructura, y FileName(i) nos devuelve el nombre completo del archivo número "i" que hemos seleccionado anteriormente.

Con el código anterior, mediante la función "iscellstr" comprobamos el tipo de variable que es "FileName". Si el valor devuelto por la función es cero, significa que sólo hemos seleccionado un fichero, y entraremos en el "if" para cambiar el valor de la variable. Para entender el funcionamiento de la función "iscellstr" sólo es necesario acudir a la ayuda de Matlab.

cmapverde_rojo.mat

Matriz creada manualmente que contiene una escala de colores. Es una matriz de dimensiones 64x3. Es decir, que contiene 64 colores diferentes, cada uno de ellos definido por su valor de rojo, verde y azul. Los tres colores corresponden a la primera, segunda y tercera columna respectivamente. En este caso la tercera columna es un vector de ceros, ya que sólo nos interesa una escala de verde a rojo.



Fig MP2: Paleta de colores establecidos en la matriz mencionada.

[convertir.jpg](#) >-----< [convertirtiff.png](#)

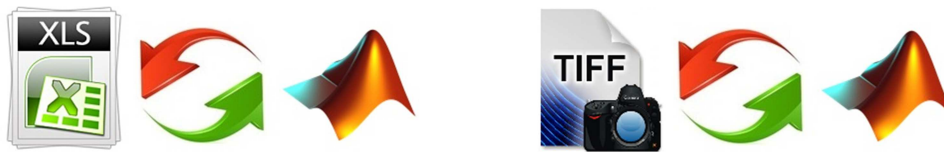


Fig MP3: Imágenes presentes en el panel de inicio del programa.

Correccion imagen EL.m

Programa para tratar las imágenes obtenidas en la medida de EL. Este programa se aplica para corregir los posibles píxeles "erróneos" en las medidas de EL de módulos a una o varias polarizaciones.

```
221 | %Aplicamos la corrección del ángulo de la imagen con la matriz generada y
222 | %guardada anteriormente.
223 - | if angulo==1
224 - |     [a,b]=size(datos_Vpoll_salida);
225 - |     matriz_correccion=struct2array(load('matriz_correccion.mat','matriz_correccion'));
226 - |     [Res_vertical,Res_horizontal]=size(matriz_correccion);
227 - |     datos_Vpoll_salida=datos_Vpoll_salida.*(matriz_correccion((1+round((Res_vertical-a)/2))):
228 - |     end
```

La matriz de corrección fue creada únicamente para nuestra cámara tras un proceso de calibración. Ahora únicamente se carga para su utilización (línea 225).

Durante la captura de la imagen de EL, es posible recortar la zona de interés y eliminar parte de la imagen. Ahora que tenemos que multiplicar término a término las dos matrices, tenemos que recortar también la matriz de corrección para que ambas tengan las mismas dimensiones.

Para ello nos quedaremos con la zona central de la matriz de corrección, ya que esa era una de las necesidades durante la captura, que la imagen se encontrase centrada. Sólo debemos de comparar las dimensiones de ambas matrices para realizar el corte centrado y posteriormente multiplicarlas.

corregir.jpg



Fig MP4: Imagen presente en el panel de inicio del programa.

Cortar imagen.m

Programa para recortar los bordes blancos de las imágenes generadas.

Al guardar las imágenes, se les añade un fondo blanco que aumenta el tamaño de la imagen, el problema es que a la hora de generar el informe se desaprovecha mucho espacio, así que se recorta la mayor parte de estos bordes.

```
29 | %Rastreamos la imagen en filas y columnas detectando cuando termina el
30 | %borde blanco.
31 - | columnas=mean(imagen_gray);
32 - | columnas=(columnas<(max(max(imagen_gray))));
33 - | x1=find(columnas,1)-10;
34 - | x2=b-find(rot90(columnas,2),1)+10;
35 |
36 - | filas=mean(imagen_gray,2);
37 - | filas=(filas<(max(max(imagen_gray))));
38 - | y1=find(filas,1)-10;
39 - | y2=a-find(rot90(filas,2),1)+10;
```

Se convierte la imagen de RGB a escala de grises. Posteriormente hacemos la media de la fila o columna según corresponda y buscamos los valores que sean igual al máximo de la imagen. Es decir, buscamos las columnas que son completamente blancas (por lo general tendrán un valor de 255).

Una vez localizados los índices de columnas y filas que cumplen la condición, nos quedamos con el índice de fila o columna que representa el cambio de ser borde a contener información, y le ponemos un margen de 10 píxeles a cada lado.

DentroFuera.m

Programa para crear una matriz lógica que nos indica si un píxel corresponde a una célula. Se utiliza para la detección de grietas y para el mapa de Rs.

```

40 %Quitamos las esquinas de las células si procede (células monocristalinas).
41 %Colocamos el resultado en la matriz que contendrá todas las células.
42 for i3=1:1:a
43     for j3=1:1:b
44         if (i3+j3)<(pixelesesquina+1)
45             celulareconstruida(i3,j3)=0;
46         elseif i3<(pixelesesquina+1) && j3>(b-pixelesesquina-1+i3)
47             celulareconstruida(i3,j3)=0;
48         elseif i3>(a-pixelesesquina-1+j3) && j3<(pixelesesquina+1)
49             celulareconstruida(i3,j3)=0;
50         elseif (i3+j3)>(a+b-pixelesesquina-1)
51             celulareconstruida(i3,j3)=0;
52         end%if
53     end%for
54 end%for
55
56 reconstruida(y1:y2,x1:x2)=celulareconstruida;
```

Esta parte del código nos sirve para “cortar” las esquinas. Los límites ya fueron calculados anteriormente.

Siendo “i3 y “j3” los índices de fila y columna respectivamente en una matriz de dimensiones “a·b”, la línea 44 se cumple en la esquina superior izquierda, la línea 46 en la esquina superior derecha. Las líneas 48 y 50 en las esquinas inferior izquierda y derecha respectivamente.

Deteccion celulas.m

Programa para detectar las células en la imagen de EL.

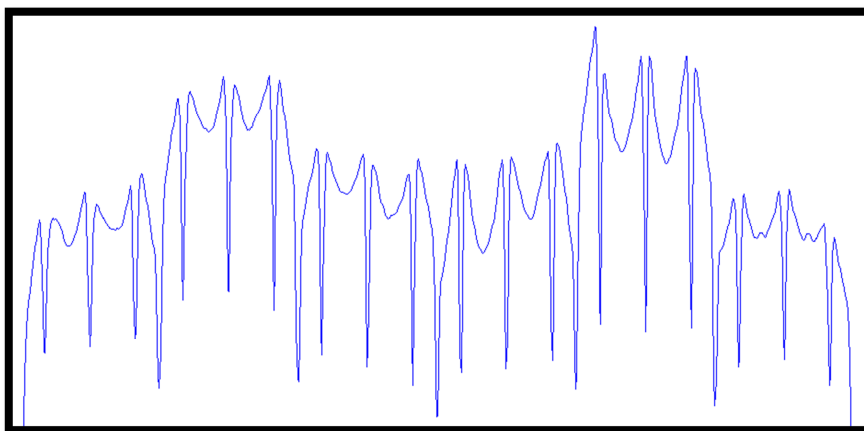


Fig MP5: Perfil de luminosidad de un módulo monocristalino con 6 filas de células, cada una de ellas con 3 buses.

El programa busca mínimos de luminosidad para localizar los límites. En este caso debería encontrar 23 límites y luego extrapolar los dos de los extremos.

```

195 -
196 -
197 -
198 -
199 -
200 -
201 -
202 -
203 -
204 -
205 -
206 -
207 -
208 -
209 -
    
```

```

for c=1:1:5
    i=1;
    final=length(columnasmin);
    while i<final
        if columnasmin(i+1)-columnasmin(i)<4
            if Aalta(columnasmin(i+1))>Aalta(columnasmin(i))
                columnasmin(i+1)=[];
            else columnasmin(i)=[];
            end
            i=i-1;
            final=final-1;
        end
        i=i+1;
    end
end
    
```

En esta parte del código, se eliminan mínimos relativos duplicados, para ello se compara si hay dos mínimos detectados que están muy cerca (línea 199) y se queda con el menor de ellos, borrando el otro (línea 201). Un ejemplo donde se detectan dos mínimos relativos juntos:

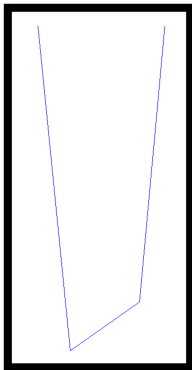


Fig MP6: Zoom de uno de los límites que hay que detectar. Si no realizamos la corrección obtendremos dos límites distintos.

En las líneas 480-514, se procede a la detección de buses, para ello se utiliza la derivada de la luminosidad por puntos. El resultado será del estilo al de la figura siguiente, donde se observa un pico de bajada seguido de uno de subida muy pronunciado. El límite se encontrará entre esos máximos y mínimos relativos.

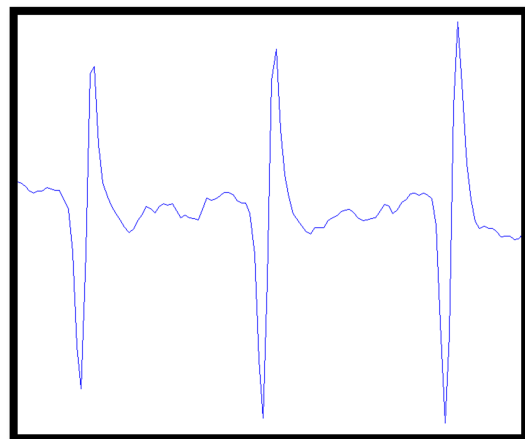


Fig MP7: Derivada de luminosidad en una célula con 3 buses.

Imagen correspondiente a los 3 buses de una célula. Los cambios bruscos de luminosidad producen esta derivada de la que nos ayudamos para encontrar los límites.

En las líneas 690-695 se corrigen los límites. Al calcular los límites célula a célula, si alguna de ellas tiene alguna grieta o defecto, el límite de esta puede haberse metido dentro de la célula. Para corregir este problema, se compara este límite con el límite obtenido con el promedio de todas las células (“celulasoriginal”). Si la variación es muy alta (8 píxeles), se entenderá que ha habido un error y se sustituirá el valor por el original aunque perdamos un poco de precisión.

La variable “error” está presente en muchas zonas de este código, su función es la de marcar que ha habido un problema en la detección de los límites de una célula, para después interpolar este límite con el de las células adyacentes. En las variables “celulasmalascolumna” y “celulasmalasfila” se almacenan los indicadores de posición de las células donde ha habido algún error.

Deteccion celulas monocristalino.m

Programa para calcular y representar el tamaño de las esquinas de las células.

```
60 %Hallaremos el límite con la derivada.
61 Calta=zeros(25,25);
62 for cfor9=1:1:25
63     Calta(cfor9)=celulasuelta(cfor9,cfor9);
64 end
65
66 derivadasesquina=zeros(25);
67 for dfor10=2:1:24
68     derivadasesquina(dfor10)=Calta(dfor10+1)-Calta(dfor10-1);
69 end
70
71 pixelesesquina=1;
72 maximoesquina=0;
73 for dfor11=1:1:24
74     if derivadasesquina(dfor11)>maximoesquina
75         maximoesquina=derivadasesquina(dfor11);
76         pixelesesquina=dfor11;
77     end
78 end
79
80 pixelesesquina=pixelesesquina+pixelesesquina_offset;
81 for i1=1:1:numeroelulasfila
82     for i2=1:1:numeroelulascolumna
83         celulas(i1,i2,5)=celulas(i1,i2,5)-2*pixelesesquina*pixelesesquina;
84     end
85 end
```

Utilizamos la derivada de la luminosidad para detectar las esquinas. La siguiente figura representa la derivada en un ángulo de 45° (perpendicular al borde de la célula en la esquina).

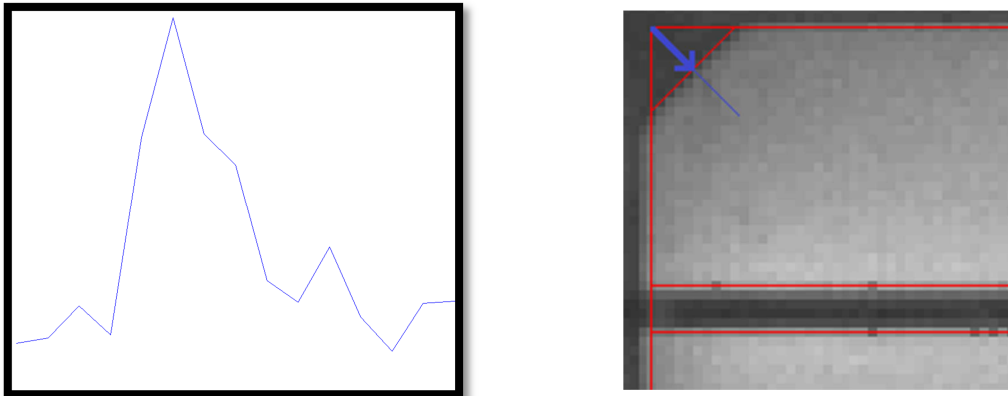


Fig MP8: Derivada de la luminosidad en la posición y dirección representada en la imagen derecha.

Ficheros Excel.m

Programa para cargar los archivos excel y pasarlos a un *.mat. Debido a como se exportan los archivos desde el programa de captura de la cámara, la imagen aparece en varias páginas del mismo libro de excel. Hay que recomponer la imagen para poder procesarla.

```
51 | %Concatenamos las hojas para formar el archivo.  
52 | for j=2:1:num_hojas  
53 |     progressBar_mod((j-1)/num_hojas,(i-1)/num_ficheros+(j-1)/num_hojas/num_ficheros);  
54 |     T=char(sheets(j));  
55 |     [datos1]=[datos1 xlsread(ruta,T)];  
56 | end
```

En la variable “datos1” se van concatenando las hojas del libro Excel donde se encuentran los datos del ensayo de EL. En cada paso por el bucle for se añade una nueva hoja. Debido al tamaño de los archivos, el proceso puede durar unos minutos, dependiendo del número de archivos a convertir y del tamaño de la imagen.

fotovoltaica.png



Fig MP9: Imagen presente en el panel de inicio del programa (Edificio de CENER, Sarriguren).

Grietas.m

Programa para detectar grietas de tipo B y C en las células. Además de calcular el porcentaje de célula afectado.

En las líneas 27-71 se hace la primera pasada para la detección de grietas. Consiste en buscar mínimos relativos sobre la imagen de alta polarización. Para ello se utiliza un bucle for, que asigna diferentes variables de entrada a la función “imextendedmin”. Se utilizan varios valores de entrada de la función porque debido a su funcionamiento, busca mínimos relativos de una sección de la imagen (variable de entrada), es decir detecta diferentes tamaños de grieta según sea su valor de entrada. Como no sabemos a priori que tamaño tienen estas grietas, se hace un barrido para poder localizar las de cualquier tamaño.

El resto de funciones que se encuentran dentro del for sólo sirven para intentar mejorar mínimamente la detección (por ejemplo se eliminan las áreas muy pequeñas porque seguramente sólo se refieren a ruido o defectos de células policristalinas).

En las líneas 109-139, mediante la función “regiongrowing”, expandimos la grieta para que ocupe todo el área que debería. Para ello se empieza a expandir desde un píxel de la imagen de alta EL (el centroide de las distintas zonas antes localizadas mediante las funciones “imextendedmin” y “regionprops”). Con un valor límite de luminosidad entre el píxel de origen y los nuevos.

Para entender el programa, se recomienda leer los archivos de ayuda referentes a las funciones “imextendedmin” y “regionprops”, así como ojear la el archivo”regiongrowing.m”.

[Inicio.fig](#) >-----< [Inicio.m](#)

Archivos para el funcionamiento de la interfaz gráfica desarrollada.



Fig MP10: Captura de la pantalla de inicio del programa.

Panel para seleccionar las diferentes opciones del programa, desde convertir archivos y corregirlos has los análisis de electroluminiscencia de módulos y células por separado.

[logo-cener-eng.jpg](#)



Fig MP11: Logotipo presente en la pantalla de inicio del programa.

Luminiscencia celulas ISE iterativo.m

Programa para calcular un mapa de la resistencia serie de la célula a partir de una medida de luminiscencia obtenida a alta polarización y otra a baja polarización.

```

107 %Eliminamos del cálculo las zonas exteriores de la célula y los buses o los
108 %puentes situados para hacer el contacto.
109 Wait=waitbar(0.5);
110 J=regiongrowing(datos_Vpol2,1,1,constantebordes);
111 sumaJcolumnas=sum(J);
112 [a,b]=size(datos_Vpol2);
113 for i=1:length(sumaJcolumnas)
114     if sumaJcolumnas(i)>constantebuses*a
115         J(:,i)=1;
116     end
117 end
118 sumaJfilas=sum(J,2);
119 for i=1:length(sumaJfilas)
120     if sumaJcolumnas(i)>constantebuses*b
121         J(:,i)=1;
122     end
123 end
    
```

Mediante el código anterior eliminamos del cálculo de RS todas las partes de la imagen que no corresponden a la célula. Es decir, quitamos todos los bordes exteriores y los buses (y los puentes para contactar la célula y polarizarla).

En el primer paso se elimina la mayor parte mediante la función “regiongrowing”, empezando a expandir la región desde un píxel que debemos quitar (utilizamos por defecto el píxel de la esquina superior izquierda, que siempre debería encontrarse en una zona no correspondiente a la célula).

En las líneas 113-123 quitamos los píxeles que pudiesen haber quedado en la zona de los buses, ya que quedan iluminados por la propia célula y la función “regiongrowing” no los elimina completamente.

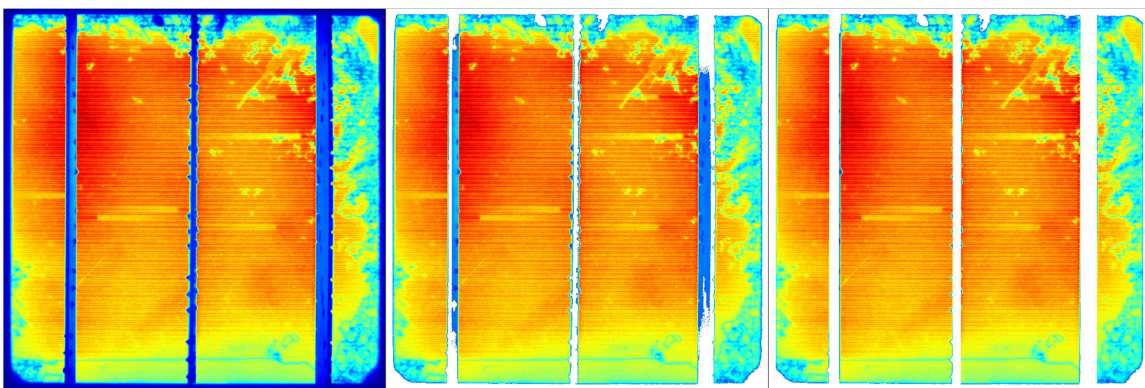


Fig MP12: Proceso de eliminación de zonas externas a la célula. De izquierda a derecha: Imagen original, imagen tras el uso de “regiongrowing” y el resultado final tras eliminar completamente los buses.

Luminiscencia celulas modulo.m

Programa para calcular individualmente un mapa de la resistencia serie de cada célula a partir del cálculo de tensiones de polarización de cada una de ellas.

```
74 | %Vamos reconstruyendo la imagen con todos los datos.  
75 - | RSreconstruida(y1:y2,x1:x2)=Rsi_i;  
76 - | Joireconstruida(y1:y2,x1:x2)=Joi_i;
```

Conforme vamos calculando el mapa de R_S de las células, se van agrupando todas ellas en una imagen reconstruida colocando las células en la misma posición de la imagen original. De esta forma mantenemos el orden y la correspondencia de píxeles entre todas las imágenes.

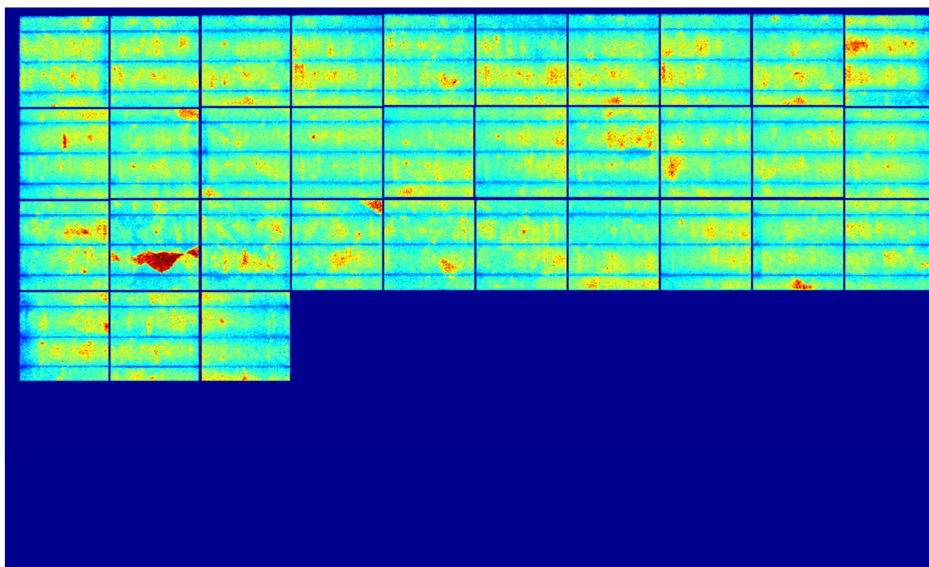


Fig MP13: Imagen del mapa R_S durante el proceso de reconstrucción.

Luminiscencia celulas modulo ISE iterativo.m

Programa para calcular un mapa de la resistencia serie de la célula a partir de una medida de luminiscencia obtenida a alta polarización y otra a baja polarización.

En las líneas 96-159 corregimos el mapa de R_S en las zonas de grietas (donde el cálculo previo da valores erróneos de resistencia). En las grietas tipo C, la resistencia calculada es muy baja, pero al ser una zona aislada no vamos a alterar el resultado.

En las grietas tipo B pasa algo parecido, pero en este caso se va a proceder a “retocar” el resultado. Como sabemos que el valor de J_o en esas

zonas no debe tener una gran variación respecto al resto de la célula, el proceso consiste en llevar el valor medio de J_0 en la grieta al valor medio del resto de la célula. De este modo al aplicar otra vez las fórmulas, el valor de resistencia serie devuelve un valor que concuerda con la realidad.

Luminiscencia_modulos.m

Programa para calcular la tensión de polarización durante la medida de EL de cada una de las células que lo componen.

matriz_correccion.mat

Matriz de corrección de imágenes de EL en función de la distancia al centro de la imagen.

Tras un proceso de calibración de la cámara, se observa que la sensibilidad de captura en los extremos de la imagen es menor. Con la ayuda de esta matriz podemos disminuir este efecto y homogeneizar la imagen.

La matriz depende de la cámara y el objetivo utilizados, de la resolución y del ángulo máximo de captura (Ver anexo).

panelEL.fig >-----< panelEL.m

Archivos para el funcionamiento de la interfaz gráfica desarrollada.

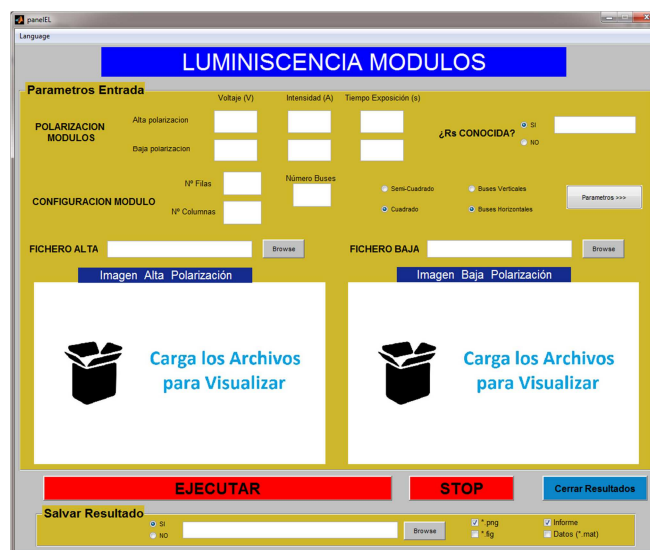


Fig MP14: Captura de pantalla del programa para el análisis de módulos.

La creación del menú de selección de idioma que encontramos en la parte superior del panel se realiza de la siguiente manera. Las funciones asociadas al menú desplegable (español_Callback, y english_Callback) son las que realmente cambian el idioma del programa, lo demás es sólo para visualizar las opciones y creación de botones.

```
43 %Creamos el menú superior para la elección del idioma.
44 - global idioma
45 - handles.idioma=uimenu('Label','Language');
46 - handles.idiomaespanol=uimenu(handles.idioma,'Label','Español','Checked','on');
47 - handles.idiomaenglish=uimenu(handles.idioma,'Label','English','Checked','off');
48 - set(handles.idiomaespanol,'Callback',{@espanol_Callback, handles});
49 - set(handles.idiomaenglish,'Callback',{@english_Callback, handles});
50 - guidata(handles.idioma,handles.idioma);
51 - guidata(handles.idiomaespanol,handles.idiomaespanol);
52 - guidata(handles.idiomaenglish,handles.idiomaenglish);
53 - idioma=1;
```

En la variable “midirectorio” guardamos la ruta de acceso del archivo cargado anteriormente. De esta forma, cuando intentamos cargar el segundo archivo, la ventana emergente se abrirá en el directorio anterior, evitándonos así tener que buscar el archivo.

```
197 - function BrowseMATbaja_Callback(hObject, eventdata, handles)
198 -     midirectorio=get(handles.DIRaltaMAT,'string');
199 -     [FileNameBaja,directory_nameBaja]=uigetfile('*.mat','elige el archivo .MAT',midirectorio);
```

Mediante el siguiente código, extraemos del nombre del archivo datos necesarios para la ejecución del programa. Los valores de polarización de los módulos se extraen de la siguiente manera. Todo consiste en seguir la nomenclatura establecida.

```
201 - B=FileNameBaja;
202 - k=strfind(B,'0-70-');
203 - B=B((k+5):end);
204 - k1=strfind(B,' ');
205 - tiempoexposicionbaja=B(1:(k1-1));
206 - k2=strfind(B,' ');
207 - k3=strfind(B,'V ');
208 - voltajebaja=B((k2+1):(k3-1));
209 - k4=strfind(B,'A');
210 - intensidadbaja=B((k3+2):(k4-1));
211 - tiempoexposicionbaja=strrep(tiempoexposicionbaja,'_','.');
212 - voltajebaja=strrep(voltajebaja,'_','.');
213 - intensidadbaja=strrep(intensidadbaja,'_','.');
```

En las líneas 463-533 copiamos la plantilla Excel creada anteriormente en el directorio de salida, y la completamos con los valores ya conocidos (intensidad, tensiones, tiempos de captura, nombre de archivos, número de proyecto, etc).

Mediante el siguiente código, incorporamos las imágenes generadas durante la ejecución del programa al informe de resultados. Para cargar las imágenes, ejecutamos desde Matlab las “macros” que se encuentran en el

archivo Excel, que se encargan de situar las imágenes en su sitio y en una escala adecuada.

```
535 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_1');
536 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_2');
537 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_3');
538 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_4');
539 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_5');
540 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_6');
541 - Excel.Run('PEGAR_IMAGEN_7');
542 - Excel.Save;
543 - Excel.Quit;
544 - Excel.release;
```

[panelELcelulas.fig](#) >-----< [panelELcelulas.m](#)

Archivos para el funcionamiento de la interfaz gráfica desarrollada.



Fig MP15: Captura de pantalla del programa para el análisis de células.

Algunas líneas de código presentes en este archivo son similares o iguales a las presentes en el archivo "panelEL.m", explicadas en el apartado anterior ([panelEL.fig](#) >-----< [panelEL.m](#)). El resto del código no es relevante o carece de dificultad para su comprensión.

[Parametros.fig](#) >-----< [Parametros.m](#)

Archivos para el funcionamiento de la interfaz gráfica desarrollada.

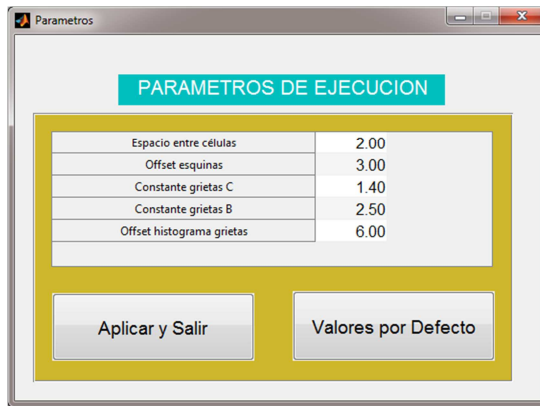


Fig MP16: Ventana para la configuración de parámetros del programa de módulos.

Esta panel de configuración aparece al pulsar el botón de “Parámetros” presente en el archivo “panelEL.fig”. Sirve para configurar varios parámetros de ejecución y así obtener unos mejores resultados. Principalmente útil para la detección y clasificación de grietas tipo B y C.

[Plantilla.xlsm](#)

Archivo Excel diseñado para ser completado desde Matlab, incluido la carga de imágenes mediante macros y otra información relevante. No todos los apartados son completados, ya que hacen referencia a resultados obtenidos mediante otros ensayos.

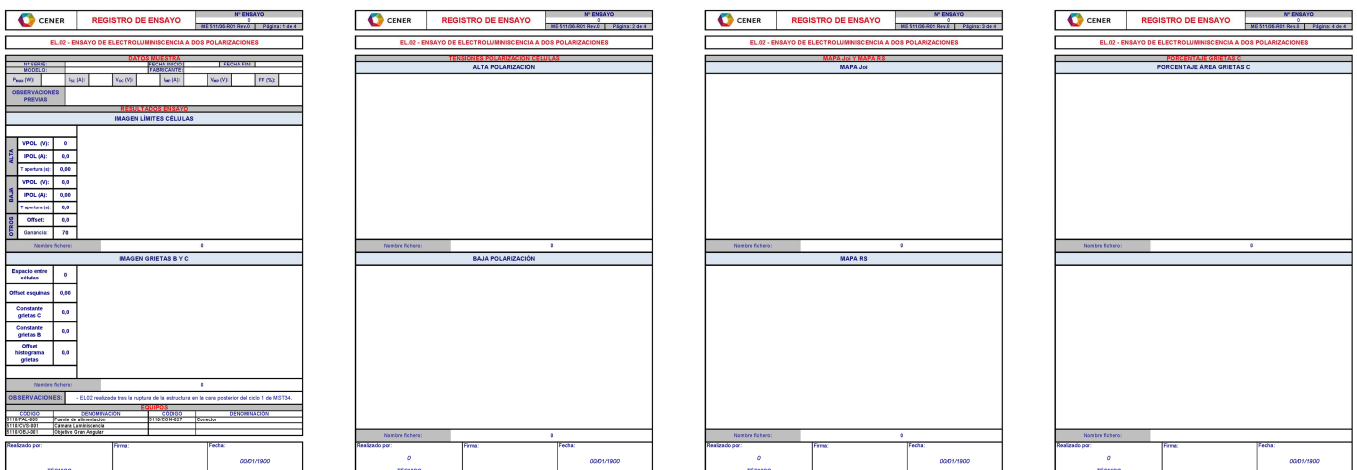


Fig MP17: Imágenes de las cuatro hojas presentes en la plantilla para la generación del informe.

[Porc grietas C.png >-----< Porc grietas C english.png](#)

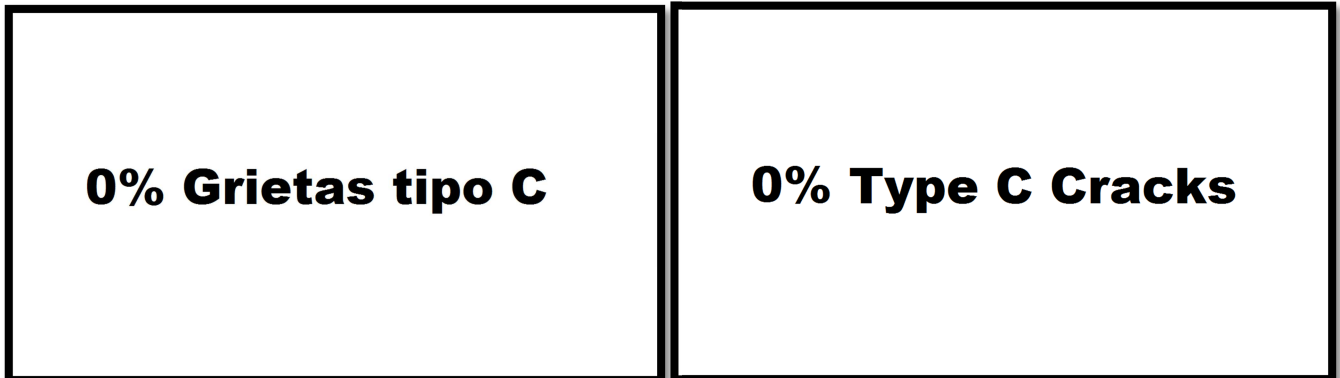


Fig MP18: Imágenes prediseñadas para el caso en el que no hubiese grietas tipo C.

[principal-5.jpg](#)

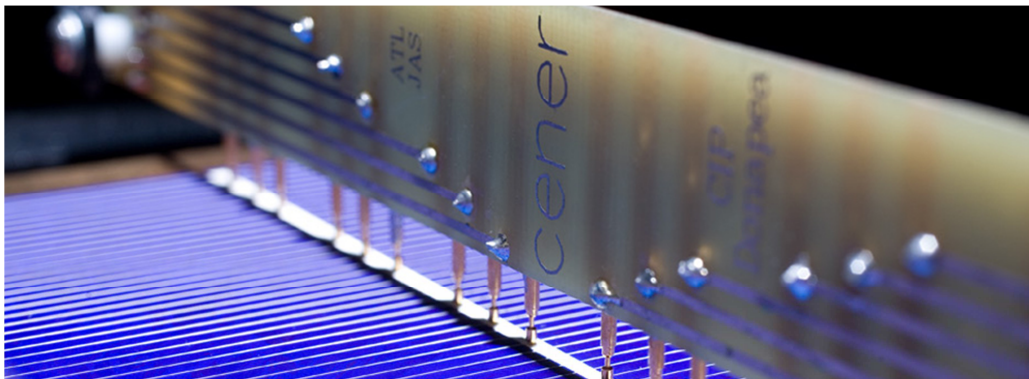


Fig MP19: Imagen presente en el panel de inicio del programa (Sistema para la conexión y polarización de una célula fotovoltaica).

[progressbar_mod.m](#)

Función obtenida en el sistema de intercambio de archivos Matlab File Exchange. Sólo ha sido modificada para eliminar alguna función implementada que no nos era de utilidad y para agilizar el tiempo de ejecución.

Autor: Steve Hoelzer.

Nos sirve para mostrar por pantalla el proceso que se está llevando a cabo en cada momento, y de forma aproximada informar al usuario de la finalización del programa.

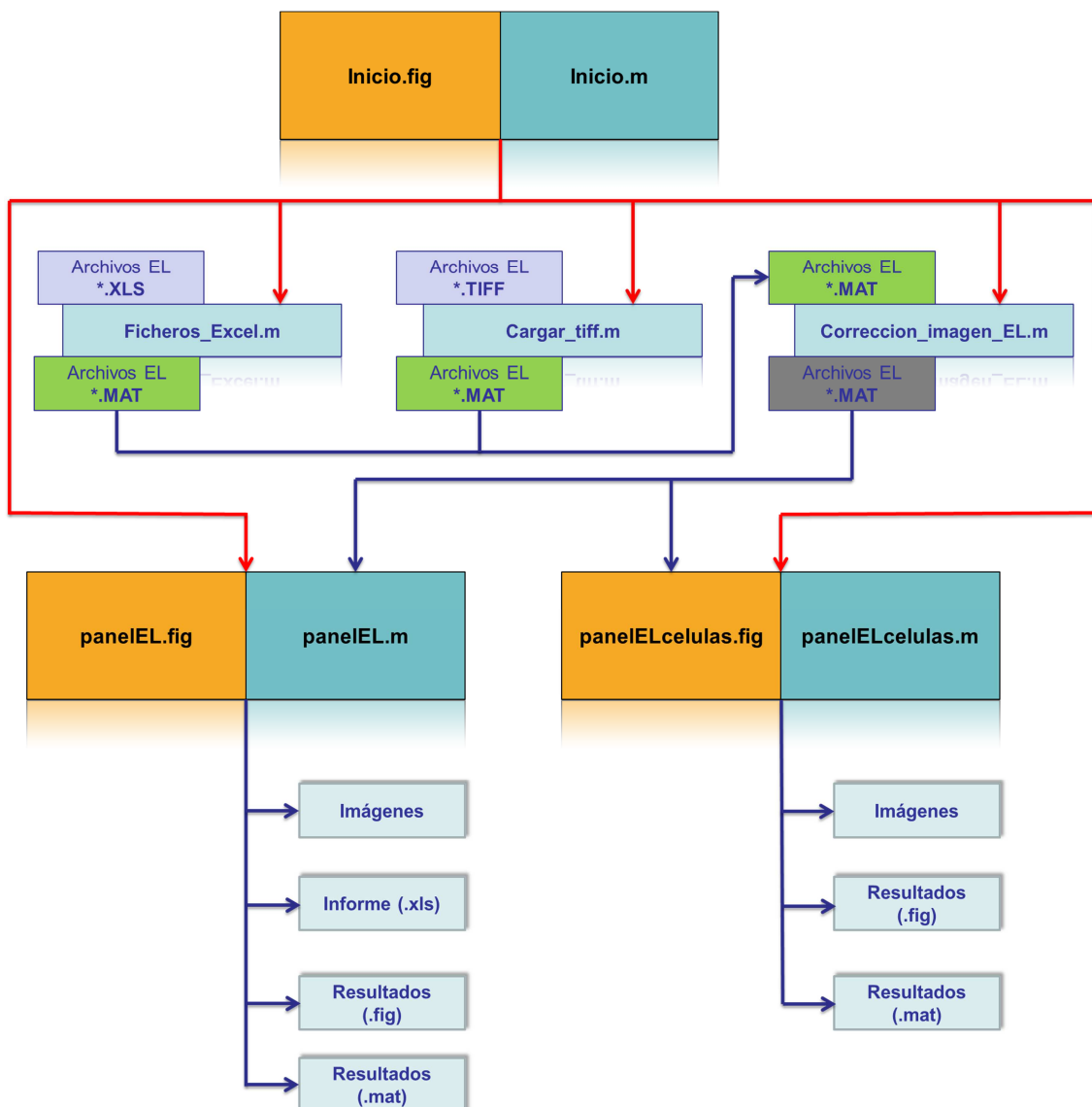
regiongrowing.m

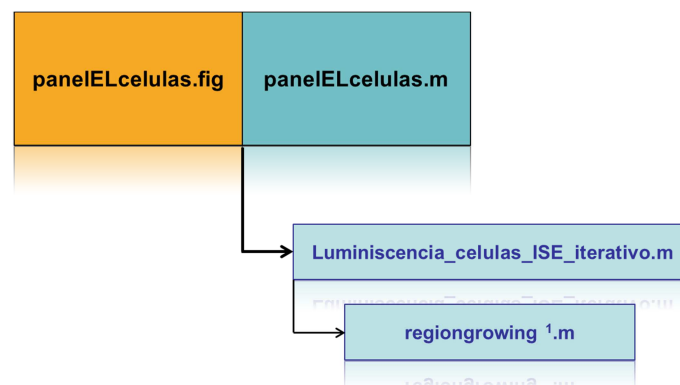
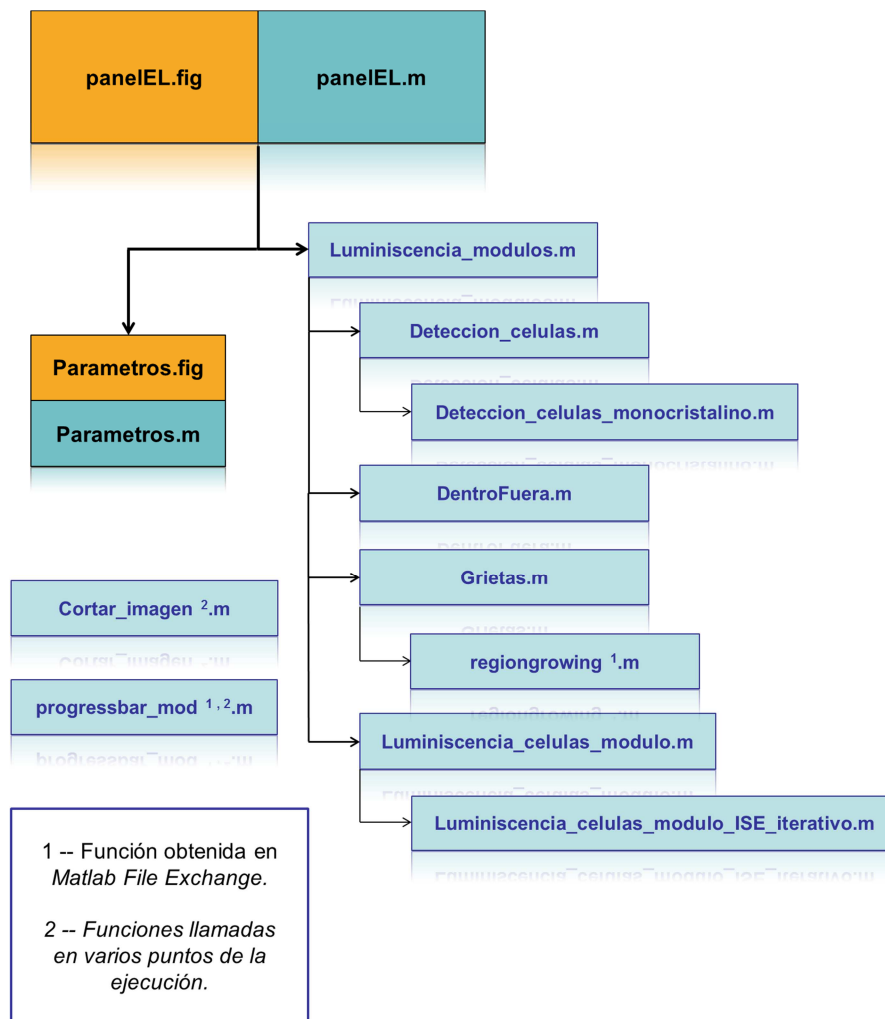
Función obtenida en el sistema de intercambio de archivos Matlab File Exchange.

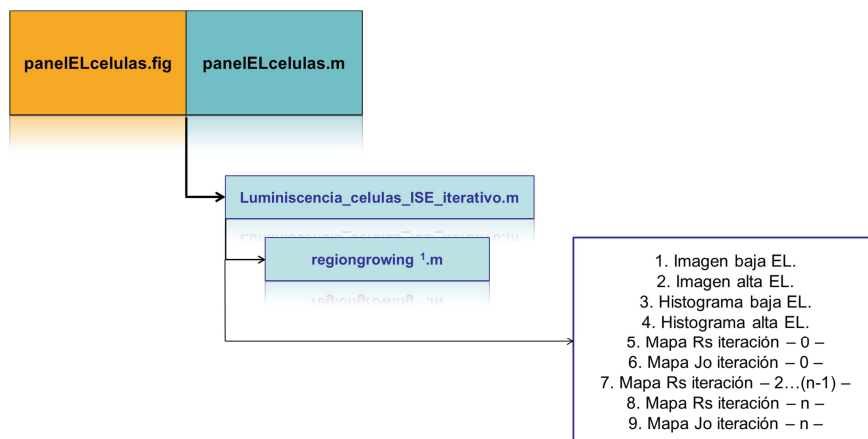
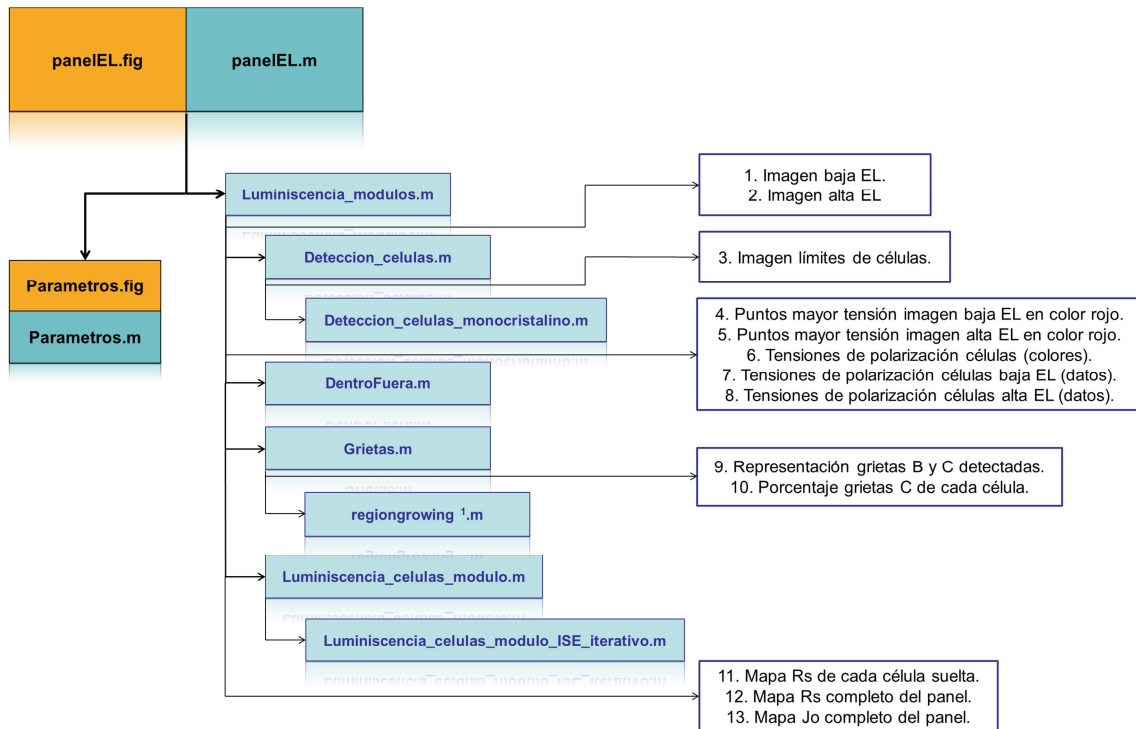
Autor: D. Kroon, University of Twente.

Función utilizada para localizar las grietas presentes en las células. Junto con las funciones “imextendedmin” y “regionprops” como indicador de punto de partida.

Estructura del Programa y Flujo de Datos.







Bibliografía

- Jonas Haunschild et al. “*Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence*”. Physica Status Solidi (RRL). 29-Junio-2009.
- O. Breitenstein et al. “*Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells*”. Physica Status Solidi (RRL). 30-October-2009.
- G.B. Alers et al. “*Degradation of individual cells in a module measured with differential IV analysis*”. Wiley InterScience. 3-Enero-2010.
- Torben Potthoff et al. “*Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging*”. Wiley InterScience. 8-Mayo-2009.
- M. Köntges et al. “*Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks*”. En: *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, (Valencia, España, 6-10 Septiembre 2010).
- M. Köntges et al. “*Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control*”. En: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, (Hamburg, Germany, 21-24 September 2009).
- Laorden Fiter, Eduardo. “*Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesamiento digital de imágenes de MATLAB*”. [PFC]. Universidad Politécnica de Madrid, Septiembre 2012.





Anexos



Quantitative analysis of PV-modules by electroluminescence images for quality control

M. Köntges*, M. Siebert, D. Hinken, U. Eitner, K. Bothe, T. Potthof
Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Germany

ABSTRACT: We present a non-destructive measurement technique to determine the operating voltage of individual solar cells in industrial manufactured photovoltaic (PV) module. This technique is based on electroluminescence imaging and makes use of two physical observations. First, the highest electroluminescence signal of each solar cell is proportional to its operating voltage and second, the sum of all operating voltages equals the externally applied PV module voltage. Thus, the measurement of the peak signals in the electroluminescence image for each cell provides the operating cell voltages. The reliability of this relation is verified by applying the method to a specially prepared PV module where we measure the individual operating cell voltages directly on exposed interconnectors. The cell voltages experimentally measured by EL are determined with a high accuracy of $\pm 0.6\%$. Moreover, the operating cell voltages determined from the electroluminescence image are used to calculate the PV module series resistance. We call this method “voltage imaging of the PV module” (VIM). Furthermore we present image pre-processing methods to reduce the impact of a number of artificial effects to our VIM approach.

Keywords: PV module, electroluminescence

1. Introduction

In recent years imaging techniques such as electroluminescence (EL) and infrared lock-in thermography have become increasingly important. Fuyuki et al. [1] introduced electroluminescence as a contactless photographic surveying method for the analysis of silicon solar cells and photovoltaic modules. Today, the EL method is used to determine values of the local effective diffusion length L_{eff} [2], the carrier collection length L_c [3] as well as the local junction voltage [4] and the series resistance [5, 6] of a solar cell. That is achieved by capturing EL images under different operating conditions and the use of optical filters that control the detectable luminescence spectrum. For PV modules EL has been demonstrated to be a powerful tool for qualitative analysis of the PV module performance. It has been shown that various PV module damages are detectable such as microcracks, disruptions within the metal grid of the solar cell, shunts between base and emitter as well as disruptions of the electrical interconnectors [7, 8, 9].

In this work, we apply the VIM approach presented by Potthoff [10] to determine the operating voltage of individual solar cells in an industrial manufactured PV module using EL imaging. The impact of artificial effects to the VIM approach are analysed and discussed.

While in the first part of the paper we present a short overview of the relevant equations describing the relation between the luminescence emission and the operating cell voltage, we focus on measurement artefacts and experimental results in the second part.

2. PV module preparation

In order to verify the EL-measured values for the solar cell operating voltages, we prepare one industrial PV module consisting of 60 $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ mono crystalline silicon solar cells connected in series in six strings of 10 cells. We choose a PV module with known defects from a previous EL-measurement. We open the back sheet layer from behind and soldered measuring lines to the inter connector of each individual solar cell (Fig. 1).

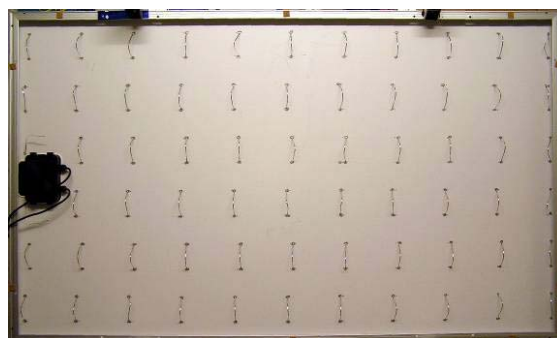


Figure 1: A commercial PV module prepared to measure the applied voltage of single cells in the PV module by a conventional voltage measurement and an EL-image.

3. Measurement

The PV test module is supplied by a dc bias current to stimulate radiative recombination in the silicon solar cells. The PV module current and voltage is measured by a circuit analyser with a precision of $5\frac{1}{2}$ digits. The luminescence emission is detected by the Sencam QE camera from PCO with a silicon charged coupled device (CCD) sensor with a resolution of 1376×1040 pixel. To improve the accuracy of the measurement two images are captured. The first image is captured while the PV module is biased with a forward direct current. The second image is captured while no current is supplied to the PV test module. In order to eliminate the dark signal of the camera and to reduce the impact of external light on the measurements the second image is subtracted from the first one. To decrease the noise the measurement cycle is repeated five times. Out of this data mean count intensity and standard deviation is calculated for each pixel.

To achieve a better signal to noise ratio we perform the measurement in a dark room with low-reflection walls and equip the camera with an optical long pass filter with a cut on wavelength of 850 nm. One pixel of the image is equivalent to approx. 0.80 mm^2 of the PV module area in our setup.

The temperature of the PV module is measured by a flat typ K Ni/CrNi sensor pressed to the back sheet in the middle of the PV module during the EL-measurement. The

* Electronic-mail: m.koentges@isfh.de

accuracy of the sensor is ± 1 K. Due to the back sheet and the EVA layer in-between the cells and the temperature sensor we systematically underestimate the temperature of the solar cells in the laminate by a few Kelvin.

We tested the influence of light generated by the PV module and reflected from the laboratory walls back to the PV module. By replacing the reflective surrounding of the PV module by a wall that absorb 96 % of the incident light we found a change of the EL-signal in the middle of the PV module of 2 %.

4. Theory

The theory for the “Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging” is explained in more detail in [Potthoff, 09].

The dependency of the local luminescence emission $\Phi(x)$ at one point x of the solar cell on the local voltage $V(x)$ is given by

$$\Phi(x) = C(x) \exp\left(\frac{V(x)}{V_T}\right), \text{ for } V(x) \gg V_T, \quad (1)$$

where V_T is the thermal voltage and $C(x)$ is a local calibration factor related to the optical and material properties of the PV module and the camera system. To deduce the operating voltage V_{op}

$$V_{op} = V(x) + R_{int}(x)I(x) + R_{ext}I \quad (2)$$

at the solar cell interconnector from the local voltage $V(x)$, the voltage drop across the series resistance along the current path from the interconnector to the position x of the solar cell has to be taken into account. Figure 2 shows a simplified schematic of a forward biased PV module and illustrates the meaning of the resistance types of Eq. 2. Two contributions to the series resistance are distinguished. The internal series resistance $R_{int}(x)$ is related to the resistance of the contact grid and the contact resistance between the metal grid and the semiconductor. The external resistance R_{ext} accounts for the resistance of the interconnectors, the contact resistance between the interconnector and the solar cell as well as for the bulk resistance of the semiconductor. $I(x)$ is the local current flowing through point x of the solar cell and I the total current supplied to the PV module.

In order to determine the operating cell voltage of an individual cell i in a PV module according to Eq. (1) and (2) we make two assumptions. Points x_{max}^i of highest EL emission on each solar cell are assumed to be located in well contacted areas for which the voltage drop across the internal series resistance $R_{int}(x_{max}^i)$ can be neglected.

Moreover, the optical and material properties of a solar cell may vary laterally. However, we assume that the optical and material properties of areas with highest EL emission are comparable on different cells i . This allows us to use the same optical calibration factor $C = C^i(x_{max}^i)$ for all solar cells in a PV module. With these assumptions the operating cell voltage for cell i is given by

$$V_{op}^i = V_T \cdot \ln\left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C}\right) + \frac{R_{mod}}{N_{cell}} I. \quad (3)$$

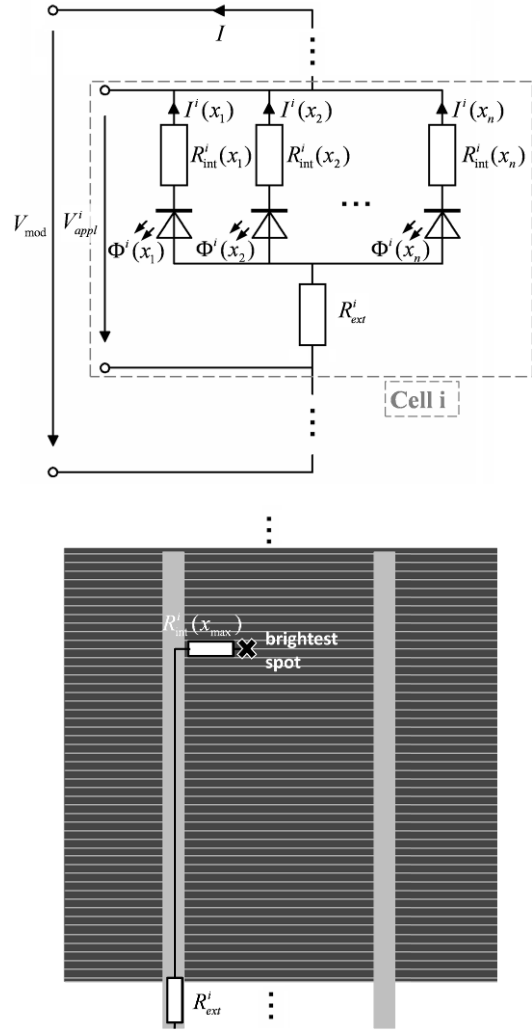


Figure 2: Simplified schematic of a solar cell in a PV module. The resistance in the PV module is composed of an internal resistance affecting the current flow from a certain point on the solar cell to the bus bar and an external resistance that lumps the resistance of interconnectors and the contacts.

In order to obtain the operating voltage V_{op}^i from Eq. (3) C and R_{int}^i need to be specified.

The total PV module voltage V_{mod} equals the sum of all operating cell voltages V_{op}^i plus the sum of the voltage drop across external resistances

$$V_{mod} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_{op}^i = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_T \ln\left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C}\right) + R_{mod} I, \quad (4)$$

with

$$R_{mod} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} R_{ext}^i. \quad (5)$$

N_{cell} is the number of solar cells in series. In previous work we verified that the influence of R_{mod} is negligible in Eq. (4) for $I < 0.1 \times I_{sc}$ [10]. Hence we neglect R_{mod} in

Eq. (4) for $I < 0.1 \times I_{sc}$ and reassemble the equation to express the scaling factor:

$$C = \frac{\sqrt{\prod_{i=1}^{N_{cell}} \Phi^i(x_{max}^i)}}{\sqrt{\exp\left(\frac{V_{mod}}{V_T}\right)}}, \quad \text{for } I < 0.1 \times I_{sc}. \quad (7)$$

Thus, in order to determine C experimentally, an EL image under low current conditions of $I < 0.1 \times I_{sc}$ is required. Inserting Eq. (7) into Eq. (3) we are able to calculate the operating cell voltage V_{op} for negligible $R_{ext}^i I$ [11]. The scaling factor is proportional to the intrinsic carrier density n_i in silicon [4]:

$$C = n_i^2 \cdot B. \quad (8)$$

The temperature dependence of n_i is well known [11] and has to be taken into account for EL measurements especially at work points with high power dissipation.

Working in operating regions above 10% of I_{sc} the PV module series resistance is given by

$$R_{mod} = \frac{V_{mod} - \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_T \ln\left(\frac{\Phi^i(x_{max}^i)}{C}\right)}{I}. \quad (9)$$

Assuming the same resistance for all interconnectors and a homogeneously distributed contact resistance, the external cell resistance is given by

$$R_{ext}^i = \frac{R_{mod}}{N_{cell}}. \quad (10)$$

5. Image processing

Before the evaluation of the EL-image we use image processing steps to correct the EL-image. In the following section these processing steps are explained.

With respect to a lateral inhomogeneity of the differing pixel sensitivities of the CCD chip, all images are divided by a calibration image. A homogenous light source (EL signal of a rear contact solar cell) is recorded with a defocused lens to generate the calibration image. The calibration image is rescaled to its mean intensity.

We found artefacts in the EL-image which seem to be impacts of nuclear radiation or cosmic radiation onto the CCD-chip of the camera, see Fig.2. If we do not eliminate these artefacts we would measure to high applied voltages at cells with this effect. Therefore we exclude always 0.1% of all camera pixels showing the highest standard deviation. This method is quit effective because nuclear radiation and cosmic radiation are single events, see Fig.3.

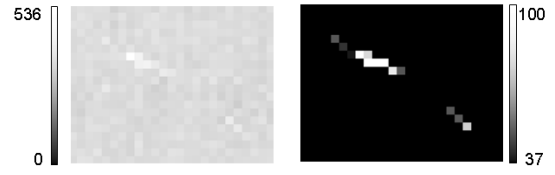


Figure 3: Left image: Enlarged part of an EL-image. Right image: Standard deviation of the same section. The standard deviation reveals the impact of cosmic or nuclear radiation.

Fig. 4 shows the angle of view β for an arbitrary point (x,y) on the PV module pane. The larger the angle of view the smaller the effective seen area by the camera and the less intensity is detected by the camera. We calculate the influence of the angel of view on the intensity detected by the camera. The matrix K compensates this geometric effect for each pixel by

$$K(x,y) = \sqrt{1 + \tan(\alpha_a) \cdot \frac{\left(x - \frac{x_0}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y_0}{2}\right)^2}{\frac{x_0}{2}}}. \quad (11)$$

The total number of pixels in horizontal and vertical direction is x_0 and y_0 respectively and α_a is the aperture angle of the camera system. The pixel coordinate x and y are the pixel positions relative to the upper left corner of the image in Cartesian coordinates. Each image is multiplied by the matrix K to correct the influence of the angle of view on the intensity.

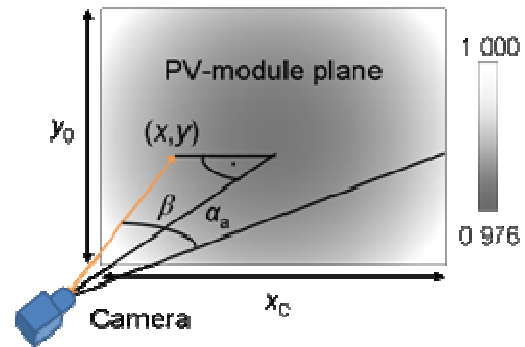


Figure 4: Density plot of the function $K(x,y)$ and definition of parameters for Eq.(11).

The information of the cell positions is required for the VIM approach. An algorithms which is fed with an extra photograph of the PV module, finds the position of the cells in the image. Furthermore the pixels x_{max}^i with the highest signal are determined for each cell i . The intensities of these pixels are used as input parameter $\Phi^i(x_{max}^i)$ in Eq. (3), (7), and (8). Fig. 4 shows a sample image including all corrections specified above and white coloured x_{max}^i positions.

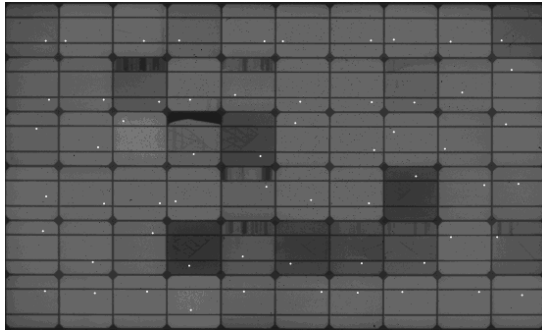


Figure 4: Electroluminescence images at 31.1 V and 0.41 A (5% of the rated current I_{sc}). Brightest pixel on each individual cells are marked white. The pixels with the highest standard deviation are marked black and are excluded from the evaluation.

To reduce the interaction between the luminescence of the solar cells in the PV module we do not use the boarder region of the cells for the VIM procedure.

6. Results

We measure the EL image for the PV module for the currents 0.41 A, 0.70 A, 0.83 A, 4.14 A, 6.62 A and 8.28 A. By the EL image at 0.41 A we evaluate the temperature independent calibration factor B with equation (8) to 1.30×10^{-39} counts/s. We determine the PV module series resistance with equation (9) to 179 m Ω by the 8.28 A image. Eq. (4) gives the relation between EL signal and the operating cell voltage V_{op}^i , shown in Fig. 5 for all measured EL images. Figure 6 shows the relative error between the direct measured operating cell voltages and V_{op}^i locally resolved on the PV module. The maximum relative error for all operating cell voltages V_{op}^i is below $\pm 1.3\%$. By comparison of Fig. 4 and 6 we find a strong correlation between cells with less EL intensity and the relative error of V_{op}^i . The operating voltages of these cells are overestimated.

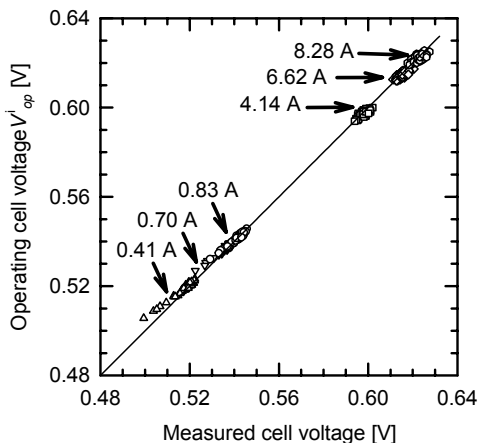


Figure 5: Operating cell voltage detected by EL signal over cell voltage measured with a voltmeter for various PV module currents. Every symbol stands for a solar cell in the PV module. The solid line corresponds to a 1:1 correlation. A slight deviation of the symbols from the solid line can be observed.

$I = 0.41A$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.26%	-0.05%	0.34%	0.21%	0.35%	0.24%	0.04%	0.18%	0.21%	0.20%
B	0.10%	0.27%	0.54%	0.20%	0.36%	0.42%	0.44%	0.34%	0.11%	0.09%
C	0.07%	0.14%	0.17%	0.35%	0.83%	0.25%	0.26%	0.19%	0.31%	0.12%
D	0.01%	0.22%	0.18%	0.22%	0.25%	0.26%	0.12%	1.01%	0.19%	0.17%
E	-0.02%	0.11%	0.20%	1.25%	0.36%	0.87%	0.61%	0.48%	0.04%	0.22%
F	-0.04%	0.29%	0.21%	0.11%	0.32%	0.12%	0.03%	0.08%	-0.08%	-0.06%

Figure 6: Relative error between the voltage measured by EL and the voltage measured by the voltmeter of each individual solar cell. For the PV module current of $I=0.41$ A we find the largest error. Large errors correlate with low EL-intensity of a cell compared to the surrounding cells, compare to Fig. 4.

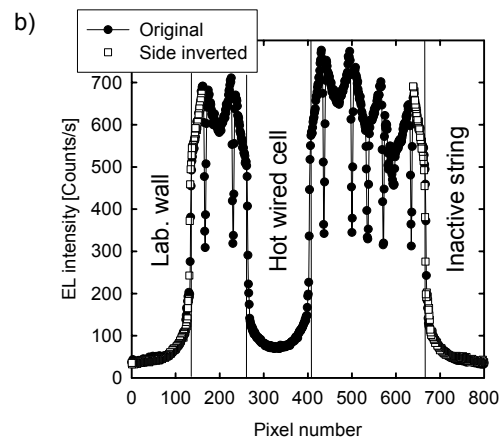
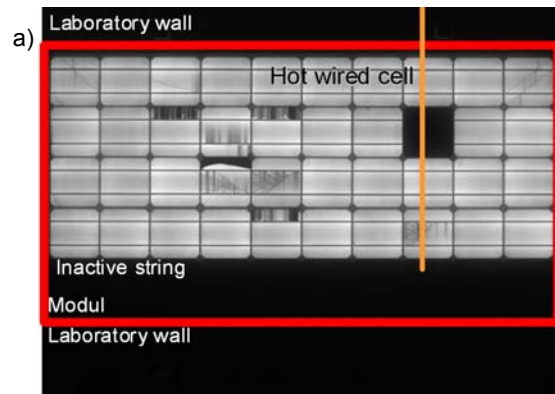


Figure 7: a) EL image taken from the test module. b) Line scan along the orange line of the upper EL-test-module image. The line scan shows the same EL intensity shape on the inactive string and the laboratory wall, compare “original” and “side inverted” signal. The intensity on the hot wired cell is influenced by at least 12% of the mean EL intensity of the active strings.

Therefore we prepared a test module and measure its EL image to identify the reason for the intensity depending relative error, see Fig 7. The PV-module was prepared to have only four active strings and one of them includes a hot wired solar cell. We find a distinct blurring of the EL-signal to the nominal dark areas (laboratory wall, inactive strings and hot wired solar cell) of the image. The blurring effect is similar inside the PV module and outside on the laboratory wall. Therefore we exclude internal reflections inside the PV module to cause the blurring. External reflections from low reflective laboratory walls back to the PV module are also excluded. As a consequence the camera system itself must be the reason for the blurring. Fig. 7 shows a hot wired solar cell in-between two active strings. The nominal dark cell has at least 12% signal intensity relative to the intensity of the surrounding strings due to this blurring effect.

Due to this effect the EL-intensities of darkish solar cells are overestimated and of bright solar cells are underestimated. As a first approach we reduce this effect by subtracting all pixel by a fraction of the mean intensity of the module image. This technique decreases the overestimation of the darkish solar cells relative to the bright solar cells. We found that a subtraction of 25% of the mean image intensity to all pixels is a good choice. After this additional pre-processing to all images, the EL images for all measured module currents were re-evaluate by Eq. (8), (9) and (4). The constant B is determined to 1.02×10^{-39} counts/s. The module series resistance is recalculated to 162 mΩ. Figure 8 shows the resulting correlation between I_{op}^I and the measured cell voltage. Figure 9 demonstrates that the relative error between I_{op}^I and the measured cell voltage is randomly distributed over the cells in the PV module now. The maximum relative error is well below 0.6%.

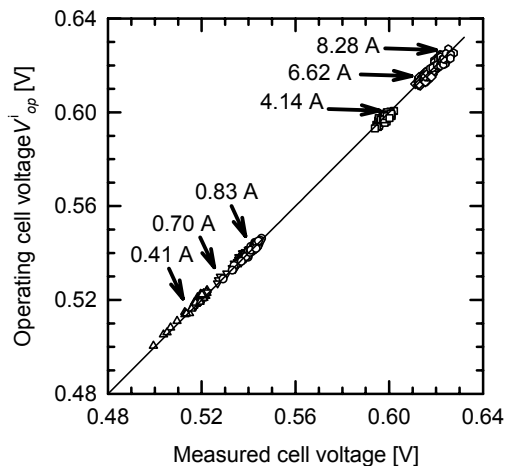


Figure 8: Reevaluation of Eq. 3 after subtraction of 1/4 of the mean intensity to the whole image. The operating voltage detected by EL is plotted over voltage measured with a voltmeter for various PV module currents. Every symbol stands for a solar cell in the PV module. The solid line corresponds to a 1:1 correlation. An excellent agreement of electrically measured and from EL image determined voltages can be observed.

$I = 0.41A$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.14%	0.09%	0.34%	0.23%	0.40%	0.37%	0.17%	0.23%	0.30%	-0.10%
B	0.10%	0.38%	0.38%	0.29%	0.40%	0.56%	0.55%	0.28%	0.07%	0.16%
C	0.11%	0.25%	0.34%	0.25%	0.29%	0.40%	0.41%	0.33%	0.29%	0.06%
D	0.10%	0.25%	0.28%	0.29%	0.17%	0.33%	0.25%	0.29%	0.17%	0.20%
E	0.09%	0.17%	0.22%	0.20%	0.14%	0.17%	0.29%	0.18%	0.13%	0.10%
F	-0.02%	0.42%	0.36%	0.28%	0.28%	0.10%	0.14%	0.19%	-0.02%	-0.01%

Figure 9: Relative error of the EL-voltage measurement and the voltage measured by the voltmeter of each individual solar cell after subtraction of 1/4 of the mean intensity to the whole image.

7. Discussion

Subtracting a mean intensity to reduce the influence of blurring effects of the camera system is a heuristic approach. This approach has to be checked with larger number of PV modules in the future.

The reason for the blurring effect of the camera system is not clear yet. Internal reflections in the camera box, internal reflections in the CCD-sensor or effects of the camera lens may cause the blurring. Further investigation is ongoing.

8. Conclusion

We present a new non destructive voltage imaging technique for PV modules (VIM) to determine the operating voltage of individual solar cells in industrial manufactured PV modules. Furthermore the PV module series resistance is characterised by this technique. The well available parameter PV module voltage, PV module current, PV module temperature and at least two EL-images are required for the VIM method.

We implemented image corrections to increase the quality of the EL-image. The operating solar cell voltage measured by the VIM approach has an error of less than $\pm 1.3\%$ for the voltage of the individual cells. The accuracy of the PV module series resistance is unclear. With an additional heuristic image manipulation we decreased the error of the operating solar cell voltage to $\pm 0.6\%$.

This is by our knowledge the only non-destructive method to determine the operating solar cell voltages with highest accuracy. Thus allowing an inside view in the PV module.

9. Acknowledgements

Funding was provided by the State of Lower Saxony.

10. References

[1] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahaschi, Y. Uraoka, *Applied Physics Letters* **86** (2005) 262108.
 [2] P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schaffer, W. Warta, S. Glunz, *Journal of Applied Physics* **101** (2007) 123110.

- [3] K. Bothe, D. Hinken, K. Ramspeck, B. Fischer, R. Brendel, *Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Italy (WIP, Milan, 2007) 1673.
- [4] K. Bothe, P. Pohl, J. Schmidt, T. Weber, P. Altermatt, B. Fischer, R. Brendel, *Proceedings of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Germany (WIP, Dresden, 2006) 597.
- [5] D. Hinken, K. Ramspeck, K. Bothe, B. Fischer, R. Brendel, *Applied Physics Letters* **91** (2007) 182104.
- [6] J. Haunschild, M. Glatthaar, M. Kasemann, S. Rein, E. R. Weber, *Phys. Status Solidi RRL* **1–3** (2009) DOI 10.1002
- [7] Y. Takahaschi, Y. Kaji, A. Ogane, Y. Uraoka and T. Fuyuki, *Proceedings of 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii (IEEE, Waikoloa, 2006) 924
- [8] A. Gabor, M. Ralli, S. Montminy, L. Alegria, C. Bordonaro, J. Woods, *Proceedings of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Germany (WIP, Dresden, 2006) 2042
- [9] M. Köntges, K. Bothe, *Photovoltaik Aktuell supplement in Elektro Praktiker* **7/8** 2008 36
- [10] T. Potthoff, K. Bothe, U. Eitner, D. Hinken, M. Köntges, Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging, *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, in press
- [11] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1981, 19

