



---

# **Universidad de Valladolid**

## **ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERIA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

***TÍTULO: AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDIDAS DE ELECTRO- Y FOTOLUMINISCENCIA PARA CÉLULAS SOLARES***

**AUTOR: ÁLVARO BLANCO ESCRIBANO**

**DEPARTAMENTO: FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA,  
CRISTALOGRAFÍA Y MINERALOGÍA**

**TUTOR: JORGE SERRANO GUTIÉRREZ**

**COTUTOR: CRISTIAN TERRADOS LÓPEZ**



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## *AGRADECIMIENTOS*

La realización de este proyecto no habría sido posible sin todas aquellas personas que, de alguna forma, han colaborado y han sido partícipes de este trabajo. A todas ellas van dirigidos mis agradecimientos.

A mi TUTOR, Dr. Jorge Serrano Gutiérrez y mi COTUTOR, Cristian Terrados López, por su apoyo y dedicación recibidos durante todo el proceso de elaboración de este proyecto, así como por darme la oportunidad de realizar este proyecto con el que tanto he disfrutado.

Al Grupo de Semiconductores Optronlab y en general a todos los miembros del laboratorio por toda la ayuda recibida.

A mi FAMILIA, a mi madre Ana Isabel Escribano, a mi padre Antonio Luis Blanco a mi hermano Javier Gerónimo Blanco, y a mi PAREJA, María Jáñez por hacer posible la consecución, no solo de este trabajo fin de grado (TFG), sino de toda mi carrera en la universidad a lo largo de estos años.

A mis AMIGOS, a todos ellos a los que estando más cerca o estando más lejos, siempre han tenido, tienen y tendrán las palabras de apoyo necesarias que le hacen a uno seguir hacia delante.

A CALATRAVA, por darme un lugar al que llamar hogar y sus buenos momentos.

Y en general a todos aquellos que de alguna manera me han ayudado.

En especial a mi abuelo Severino Escribano, a quien extraño cada día.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## ***RESUMEN del TRABAJO FIN DE GRADO***

TÍTULO: AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDIDAS DE ELCTRO- Y FOTOLUMINISCENCIA PARA CÉLULAS SOLARES

GRADO: INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

TUTOR: JORGE SERRANO GUTIÉRREZ

COTUTOR: CRISTIAN TERRADOS LÓPEZ

AUTOR: ÁLVARO BLANCO ESCRIBANO

RESUMEN:

Este TFG trata sobre el diseño y programación de una aplicación en Python que permita controlar un láser de alta potencia, capturar imágenes de una cámara, y sincronizar medidas de foto- y electroluminiscencia con una fuente de alimentación para poder tomar medidas en *on* y *off*. El objetivo de este trabajo es automatizar en la medida de lo posible el proceso antes descrito, reduciendo la manipulación de los equipos por acción humana. De esta manera se mejoran las condiciones de trabajo personal y se facilita el proceso de obtención de datos y resultados con mayor rapidez.

Para desarrollar el programa se ha elegido desarrollarlo en *Python* ya que es un lenguaje de programación de alto nivel que se utiliza para desarrollar aplicaciones de todo tipo. A diferencia de otros lenguajes como Java o .NET, se trata de un lenguaje interpretado, es decir, que no es necesario compilarlo para ejecutar las aplicaciones escritas en *Python*, sino que se ejecutan directamente en el ordenador utilizando un programa denominado interpretador, por lo que no es necesario “traducirlo” a lenguaje máquina.

Los instrumentos que se han utilizado para este proyecto han sido una fuente de alimentación modelo CPX400D de AIM-TTi, un sistema diodo láser DS3-11312-101-K635F09FN-0.40W de BWT Beijing y una cámara digital DCAM-API.

## INDICE

<b>MEMORIA</b> .....	9
<b>1.INTRODUCCIÓN AL PROYECTO</b> .....	9
<b>1.2 EFECTO FOTOELÉCTRICO</b> .....	9
<b>1.3 EFECTO FOTOVOLTAICO</b> .....	13
<b>1.3.1 LUMINISCENCIA</b> .....	14
<b>1.4 APLICACIONES DEL EFECTO-FOTOVOLTAICO</b> .....	16
<b>1.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA</b> .....	16
<b>1.6 CÉLULA SOLAR</b> .....	18
<b>1.7 PANELES SOLARES</b> .....	20
<b>1.8 TIPOS DE INSTALACIONES</b> .....	21
<b>1.8 INSTALACIÓN RED ELÉCTRICA</b> .....	23
<b>METODOLOGÍA</b> .....	24
<b>2. OBJETIVOS Y EQUIPO UTILIZADO</b> .....	24
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b> .....	26
<b>2.2 DESCRIPCIÓN DEL DIODO LÁSER</b> .....	27
<b>2.3 DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA DIGITAL</b> .....	29
<b>3. APLICACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN</b> .....	32
<b>3.1 PHYTON</b> .....	32
<b>3.1.1 ORIGEN</b> .....	32
<b>3.1.2 BENEFICIOS DE PHYTON FRENTE A OTROS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN</b> .....	32
<b>3.1.3 APLICACIONES PARA SU USO</b> .....	33
<b>3.2 FUNCIONAMIENTO APLICACIÓN</b> .....	36
<b>3.3 PANTALLA PRINCIPAL</b> .....	37
<b>3.4 CONEXIÓN PUERTO SERIE</b> .....	38
<b>3.5 CONTROL ELECTROLUMINISCENCIA</b> .....	39
<b>3.6 CONTROL FOTOLUMINISCENCIA</b> .....	41
<b>3.7 HIPIC</b> .....	43
<b>3.7.1 CAPTURA DE IMÁGENES</b> .....	44
<b>4.CAPTURAS</b> .....	48
<b>4.1 CAPTURAS FOTOLUMINISCENCIA</b> .....	48
<b>4.2 CAPTURAS ELECTROLUMINISCENCIA</b> .....	50
<b>5. TRATAMIENTO DE IMÁGENES</b> .....	52
<b>5.1 REDUCCIÓN DEL RUIDO Y AJUSTE DEL CONTRASTE</b> .....	53



---

5.2 APLICACIÓN DE LUTs .....	57
6. RESULTADOS DE LAS IMÁGENES .....	58
7. ANALISIS CUALITATIVO DE LAS IMAGENES EN LAS CELULAS SOLARES .....	61
8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	66
9. ANEXOS .....	68

## INDICE DE IMAGENES

Imagen 1: Efecto fotoeléctrico .....	9
Imagen 2: Expulsión del electrón por medio de fotones incidentes.....	10
Imagen 3: Gráfica de energía de la luz en función de su longitud de onda.....	12
Imagen 4: Ejemplo funcionamiento material PN para generar energía eléctrica .....	13
Imagen 5: Materiales tipo N y tipo P.....	14
Imagen 6: Distribución de $W/m^2$ en la superficie de la tierra.....	17
Imagen 7: Instalación fotovoltaica de uso en el hogar.....	18
Imagen 8: Estructura célula solar .....	18
Imagen 9: Panel solar fotovoltaico.....	20
Imagen 10: Tipos de paneles fotovoltaicos con sus respectivas células .....	21
Imagen 11: Instalación de autoconsumo.....	22
Imagen 12: Instalación red eléctrica .....	23
Imagen 13: Vista exterior e interior de la estación de trabajo.....	24
Imagen 14: Vista de la oblea de silicio y de la cámara en su posición de operación .....	25
Imagen 15: Vista frontal de la fuente de alimentación .....	26
Imagen 16: Vista trasera de la fuente de alimentación.....	26
Imagen 17: Vista frontal del sistema del diodo láser .....	27
Imagen 18: Vista trasera del sistema de diodo láser.....	28
Imagen 19: Sistema de sujeción para el haz diodo láser .....	28
Imagen 20: Cámara C14041-10U .....	30
Imagen 21: Lente para captar las imágenes de PL y EL .....	30
Imagen 22: Vista frontal fuente alimentación.....	31
Imagen 23: Vista trasera fuente alimentación .....	31
Imagen 24: Pantalla principal de la aplicación .....	37
Imagen 25: Pantalla principal de la aplicación. Ventana selección puerto serie.....	38
Imagen 26: Ventana selección puerto serie.....	38
Imagen 27: Pantalla principal de la aplicación. Método control por fuente .....	39
Imagen 28: Mando de control de la fuente de alimentación.....	40
Imagen 29: Visualización estado de la fuente de alimentación .....	40
Imagen 30: Pantalla principal de la aplicación. Método control por diodo láser .....	41
Imagen 31: Mando de control del diodo láser .....	41
Imagen 32: Visualización estado del diodo láser .....	42
Imagen 33: Pantalla de inicio de Hipic.....	44
Imagen 34: Pantalla de principal de Hipic .....	45
Imagen 35: Herramientas de Hipic.....	45
Imagen 36: Vista de la captura de la célula solar .....	46
Imagen 37: Mensaje de Hipic para guardar la captura.....	47
Imagen 38: Carpeta de capturas de Hipic .....	47
Imagen 39: Prueba fotoluminiscencia de 0.5 W.....	48
Imagen 40: Prueba fotoluminiscencia de 1.0 W .....	48
Imagen 41: Prueba fotoluminiscencia de 1.5 W.....	48
Imagen 42: Prueba fotoluminiscencia de 2.0 W.....	48
Imagen 43: Prueba fotoluminiscencia de 5.0 W.....	49
Imagen 44: Prueba fotoluminiscencia de 8.0 W.....	49



Imagen 45: Prueba fotoluminiscencia de 10.0 W .....	49
Imagen 46: Prueba fotoluminiscencia de 15.0 W .....	51
Imagen 47: Prueba electroluminiscencia de 0.8 A.....	50
Imagen 48: Prueba electroluminiscencia de 1.0 A.....	50
Imagen 49: Prueba electroluminiscencia de 2.5 A.....	50
Imagen 50: Prueba electroluminiscencia de 3.5 A.....	50
Imagen 51: Prueba electroluminiscencia de 8.0 A.....	51
Imagen 53: Prueba electroluminiscencia de 10.0 A .....	51
Imagen 54: Ventana principal de control del software para tratamiento de imágenes Fiji .....	52
Imagen 55: Ventaja ajuste contraste software Fiji .....	53
Imagen 56: Contraste ajustado de manera manual e histograma.....	54
Imagen 57: Contraste ajustado de manera automática e histograma.....	55
Imagen 58: Ajuste de ruido con una amplia área de pixeles alta y un nivel de desviación bajo.	56
Imagen 59: Ajuste de ruido con una amplia área de pixeles baja y un nivel de desviación alto.	56
Imagen 60: Diferentes Look Up Tables aplicadas sobre la oblea.....	57
Imagen 61: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 A y 1.0 A respectivamente. Ajuste contraste .....	58
Imagen 62: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 A y 1.0 A respectivamente. Ajuste ruido .....	59
Imagen 63: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 A y 1.0 A respectivamente. Aplicación LUTs .	59
Imagen 64: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 W y 1.0 W respectivamente. Ajuste contraste .....	60
Imagen 65: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 W y 1.0 W respectivamente. Reducción ruido .....	60
Imagen 66: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 W y 1.0 W respectivamente. Aplicación LUTs .....	61
Imagen 67: Muestra ensayo fotoluminiscencia una vez aplicadas todas las correcciones .....	63
Imagen 68: Muestra con el ajuste 6 shades de LUTs en Fiji.....	64
Imagen 69: Muestra con el ajuste 16 colors de LUTs en Fiji .....	64
Imagen 70: Muestra con el ajuste blue-orange-igb de LUTs en Fiji.....	65

## MEMORIA

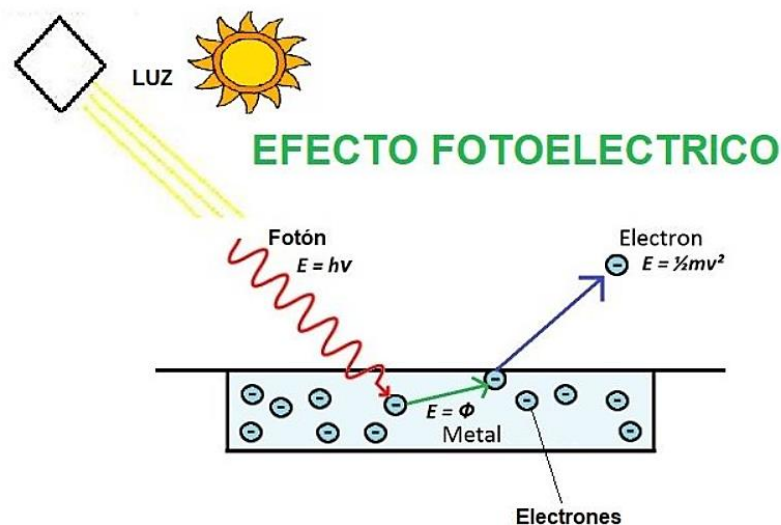
### 1. INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

#### 1.2 EFECTO FOTOELÉCTRICO

El efecto fotoeléctrico describe emisión de electrones de los átomos de un metal cuando sobre éste incide un haz de luz que los excita (radiación electromagnética), liberándolos de la atracción de su átomo [1].

Los materiales que al absorber la radiación electromagnética de la luz emiten electrones se les llama "fotoemisores" y son todo metales.

Si recordamos que la corriente eléctrica es simplemente un movimiento de electrones, el efecto fotoeléctrico puede ser una forma de generar corriente eléctrica, ya que la luz mueve electrones.



**Efecto Fotoeléctrico** = Emisión de los electrones de un metal cuando incide sobre el metal una luz

Imagen 1: Efecto fotoeléctrico

Fuente: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectrico.html>

Realmente las partículas que liberan a los electrones son los fotones. En realidad, la luz se compone de infinidad de partículas muy pequeñas, sin masa, pero con energía, denominadas "fotones".

Cuando estos fotones llegan al metal, al colisionar con un electrón del átomo del metal, si el fotón tiene suficiente energía, esta energía se la cede al electrón y lo libera de su última capa, es decir lo libera de la atracción del átomo, quedando libre por el metal o expulsándolo fuera de él. Los fotones interaccionan con los electrones cediéndoles energía y liberándolos del metal siempre y cuando la energía del fotón sea superior a la función de trabajo  $\Phi$  del metal.

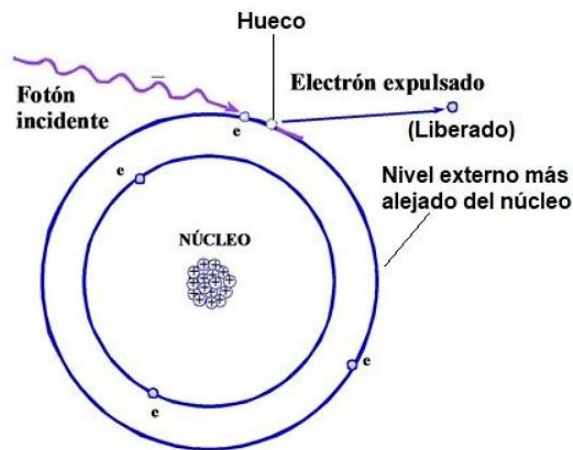


Imagen 2: Expulsión del electrón por medio de fotones incidentes

Fuente: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectronico.html>

Los electrones más cercanos al núcleo están muy unidos a él y tienen poca energía.

Los más externos son los que tienen más energía, pero los que resulta más fácil hacerles abandonar el átomo, porque precisamente son los más alejados y menos unidos al núcleo.

Estos electrones son los que expulsan o liberan los fotones al llegar al metal y se llaman "electrones de valencia" porque son los que pueden formar enlaces con otros átomos cercanos.

Realmente los electrones de valencia de un átomo de un metal están siempre unidos a otros electrones de otro átomo cercano del metal mediante lo que se conoce como enlace metálico. En un metal, los electrones de valencia están libres y disponibles para moverse a través de todo el metal, por lo que la energía que requieren para salir de la superficie del metal es muy pequeña. Por ello el efecto fotoeléctrico se da predominantemente en los metales y se puede observar con luz ultravioleta.

Si un fotón expulsa un electrón de un átomo, también rompe ese enlace metálico que tenía, dejando un hueco en el enlace. Esto es lo que se conoce como par electrón-hueco. Siempre que se libera un electrón, se deja un hueco en el átomo.

El material dominante utilizado en la tecnología fotovoltaica es el silicio cristalino debido a sus propiedades de semiconductor. Sus propiedades físicas y químicas son muy favorables para propiciar el denominado efecto fotovoltaico.

Para el silicio observamos que:

Los electrones y huecos que se generan al iluminar el material se mueven por su interior de forma aleatoria, cada vez que un electrón encuentra un hueco, lo ocupa y libera la energía adquirida anteriormente por el fotón. Esto se llama recombinación de un par electrón-hueco. Dependiendo del proceso de recombinación, ésta puede dar lugar a la emisión de luz – fotoluminiscencia, o puede generar calor – también llamada recombinación no radiativa.

En un semiconductor, como el silicio, el germanio, o el GaAs, existe una separación entre los niveles de energía electrónicos colectivos asociados a los electrones de valencia y aquellos niveles asociados a estados de conducción. Estos estados se agrupan en lo que se denominan bandas electrónicas de valencia y bandas electrónicas de conducción, y la separación se hace mínima entre dos puntos de la banda superior de valencia y la banda inferior de conducción. Esta separación mínima es lo que en inglés se denomina *band gap* electrónico del material. En el silicio se corresponde con el valor de 1,12 eV, y describe la energía mínima necesaria para crear un par electrón-hueco en este material al pasar un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción.

La energía de un fotón depende de la longitud de onda de la luz a la que pertenece. Como la luz puede tener diferentes longitudes de onda, podemos encontrarnos con fotones con diferentes energías.

Si la energía del fotón es inferior a la energía de enlace del material, lo atraviesa, pero sin producir ningún efecto, es decir no será capaz de liberar ningún electrón.

Por ejemplo, en el caso del Silicio, los fotones con longitudes de onda superiores a 1.100nm (nanómetros), tienen una energía inferior a 1,2 eV y no pueden producir pares electrón-hueco.

Las diferentes energías de los fotones corresponden a las diferentes longitudes de onda que componen lo que se conoce como el "espectro electromagnético solar" o "espectro de la luz".

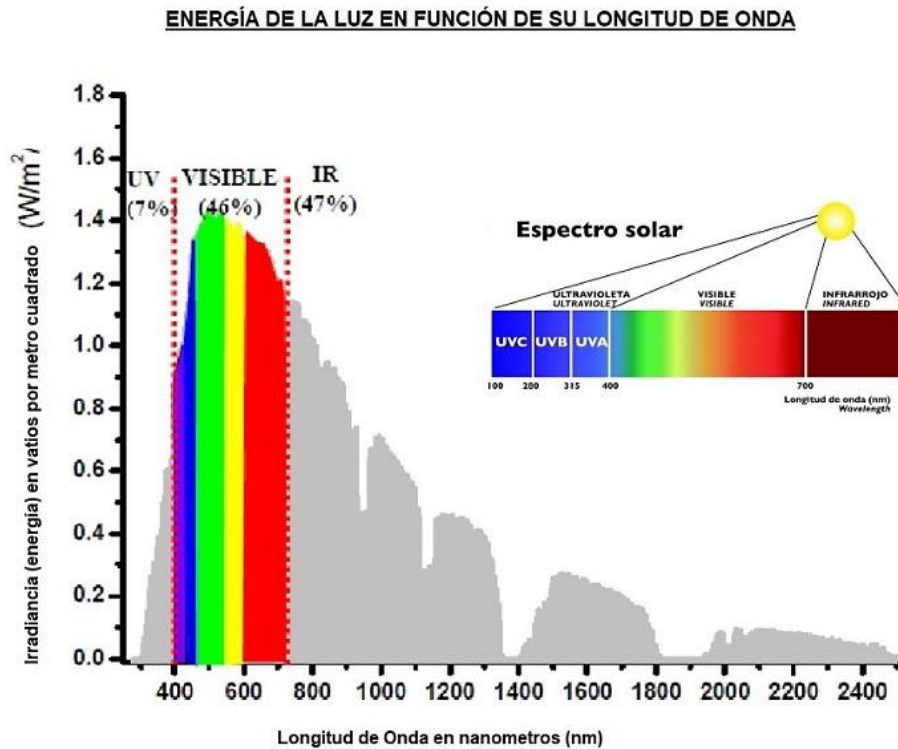


Imagen 3: Gráfica de energía de la luz en función de su longitud de onda

Fuente: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectrico.html>

Como se ha podido observar en la imagen 3 de la página anterior, los haces de luz que tienen entre 400 y 700 nm de longitud de onda son visibles, el resto no son visibles por el ojo humano, como por ejemplo la infrarroja o la ultravioleta, pero eso no significa que no tengan energía.

Además, se aprecia como la energía de la onda (y de los fotones) es mayor para ondas con longitudes de onda más pequeñas. Como la frecuencia de la onda es inversamente proporcional a la longitud de onda, a mayor frecuencia de la onda, mayor energía.

La investigación del impacto fotoeléctrico provocó avances importantes en la comprensión de la forma cuántica de la luz y de los electrones y afectó el desarrollo de la idea de la dualidad onda-partícula (una onda formada por partículas, los fotones) para explicar la energía luminosa.

Un claro ejemplo de esto sería el trabajo galardonado con un premio Nobel de Albert Einstein titulado "On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light", que fue el origen de la física cuántica ya que realizó la primera formulación de fotones como partículas con una energía concreta, y la base para el efecto fotovoltaico.

### 1.3 EFECTO FOTOVOLTAICO

Una de las principales aplicaciones del efecto fotoeléctrico es el efecto fotovoltaico, de hecho, muchas veces la gente habla de uno u otro como si fueran lo mismo, pero realmente no lo son.

Podemos decir que el efecto fotovoltaico es un proceso del efecto fotoeléctrico, que consiste en la generación de corriente eléctrica a través del efecto fotoeléctrico de excitación de electrones de un material semiconductor mediante la luz, por ejemplo, en una celda solar o en los paneles solares [2].

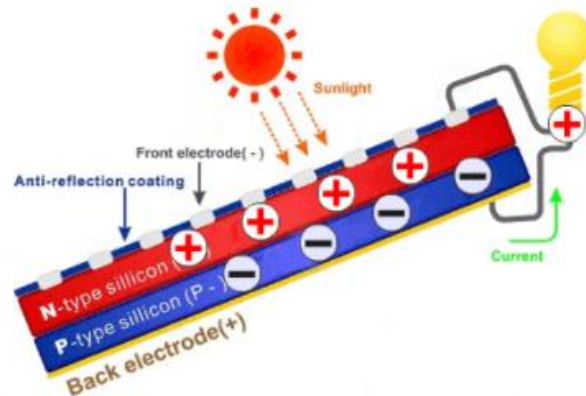


Imagen 4: Ejemplo funcionamiento material PN para generar energía eléctrica

Fuente: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectrico.html>

El efecto fotoeléctrico produce electrones libres (cargas) y el efecto fotovoltaico produce corriente eléctrica gracias a esos electrones libres liberados mediante el efecto o proceso fotoeléctrico.

Los elementos para producir el efecto fotovoltaico son las placas o celdas solares que son semiconductores dopados (o extrínsecos) P y N unidos (unión PN).

**Semiconductores dopados:** Aquel material en el que se han introducido cantidades controladas de átomos de impureza (donantes) con el propósito de aumentar la concentración de electrones o la de huecos.

**Semiconductores tipo N:** Aquel material que contiene más electrones que huecos libres. Los átomos de este tipo se llaman donadores porque “donan” o entregan electrones. Algunos dopantes que incrementan el número de electrones son los que suelen tener valencia V (pentavalentes) como el fósforo, el arsénico, el antimonio, etc...

**Semiconductores Tipo P:** Aquel material que contiene más huecos que electrones. Los átomos de este tipo se llaman aceptores porque “aceptan” o toman un electrón. Algunos dopantes que incrementan el número de huecos son los que suelen tener valencia III (trivalentes) como el boro, el galio, el indio, el aluminio, etc...

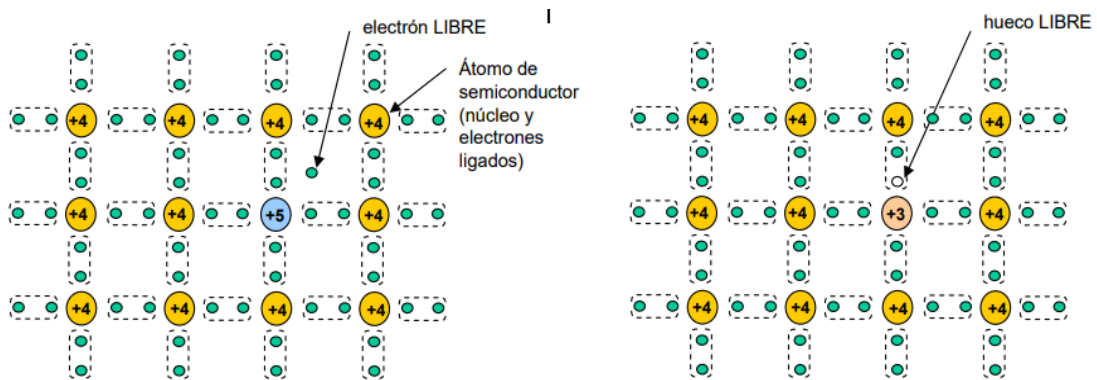


Imagen 5: Materiales tipo N y tipo P

Fuente: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/efecto-fotoelectrico.html>

### 1.3.1 LUMINISCENCIA

Es el fenómeno de emisión de luz por sólidos o moléculas los cuales se encuentran excitados por una fuente externa, dicha excitación eleva a los electrones a estados de conducción creando huecos en los estados de valencia. Los electrones excitados, al volver a su estado de equilibrio, se recombinan con los huecos de los niveles de valencia emitiendo luz [3]. En lo que a los semiconductores respecta, el efecto de luminiscencia se produce por la recombinación radiativa de pares electrón-hueco. Existen dos tipos de espectros de luminiscencia: emisión intrínseca o fundamental y emisión extrínseca o característica.

La emisión intrínseca aparece como una banda de energías de distribución casi normal a temperatura ambiente, con el foco de intensidad para la energía de banda prohibida, *banda gap*,  $E_g$ ,  $h\nu = E_g$ . Esto es debido a la recombinación de electrones de la banda de conducción y de huecos en la banda de valencia, siendo por tanto una propiedad intrínseca del material.

La emisión extrínseca depende de las impurezas y, por ende, no es intrínseca a la naturaleza del semiconductor. Estas bandas de emisión extrínsecas se activan por átomos de impurezas y otros defectos de la red cristalina del material, siendo la emisión característica de la propia impureza o defecto. Esto hace posible determinar en algunos casos la concentración de impurezas o defectos del material a partir de la intensidad relativa de la emisión extrínseca e intrínseca.

Dependiendo del tipo de fuente de excitación, existen varias formas de luminiscencia, como son:

1. Fotoluminiscencia.
2. Electroluminiscencia.
3. Termoluminiscencia.
4. Quimioluminiscencia.
5. Triboluminiscencia.

En el diagnóstico y estudio de las células solares nos vamos a centrar en dos de estos fenómenos: la fotoluminiscencia y la electroluminiscencia:

- **Fotoluminiscencia:** La Fotoluminiscencia es un tipo de luminiscencia en la que el agente excitador de los pares electrón-hueco es un fotón con energía suficiente para vencer la energía de banda prohibida y así elevar un electrón a un estado de excitación mayor. Una vez en ese estado de excitación mayor, el electrón decae emitiendo calor hasta llegar al mínimo de la banda inferior de conducción, desde donde se produce la recombinación radiativa de un par electrón-hueco y se emite un fotón. A nivel macroscópico, el conjunto de esos fotones emitidos es lo que denominaremos fotoluminiscencia.
- **Electroluminiscencia:** Es un tipo de luminiscencia en la que la excitación necesaria para elevar un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción se efectúa inyectando portadores mediante una corriente



eléctrica. Cuando el par electrón-hueco se recombina de forma radiactiva emite luminiscencia, la cual denominaremos electroluminiscencia.

## 1.4 APLICACIONES DEL EFECTO-FOTOVOLTAICO

Además de la fotovoltaica ya explicada, el efecto fotoeléctrico se utiliza en una gran cantidad de dispositivos, incluyendo fotocopiadoras, electrificación de viviendas rurales, conexión a red, tratamiento de aguas, señalizaciones, medidores de luz e incluso componentes electrónicos como fotodiodos, fototransistores, optoacopladores, etc...

Otra aplicación para el efecto fotoeléctrico son los centelladores o detectores de radiación. Un centellador es un dispositivo que emitirá luz cuando detecta radiación de una fuente de luz en el laboratorio o de una fuente cósmica (del espacio).

## 1.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El Sol es la **fuentes principal de vida en la Tierra**. Puede satisfacer todas nuestras necesidades de energía si sabemos cómo aprovechar de forma racional la luz que continuamente extiende sobre el planeta. Ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia.

La importancia del aprovechamiento de la energía solar proviene de:

Es una **fuentes inagotable, accesible y gratuita**, y existe una **necesidad de electricidad cada vez mayor** en el mundo y cada vez se van buscando nuevos **modelos de generación de energía más respetuosos** con el entorno. La cantidad de energía que el Sol vierte diariamente sobre la Tierra es diez mil veces mayor que la que se consume al día en todo el Planeta.

España está favorecida por su situación geográfica y climatología para aprovechar este tipo de energía. La energía solar llega a nuestro planeta Tierra en forma de radiación electromagnética procedente del Sol (luz y calor). Esta energía la podemos aprovechar para convertirla en energía eléctrica u otro tipo de energía útil [4].

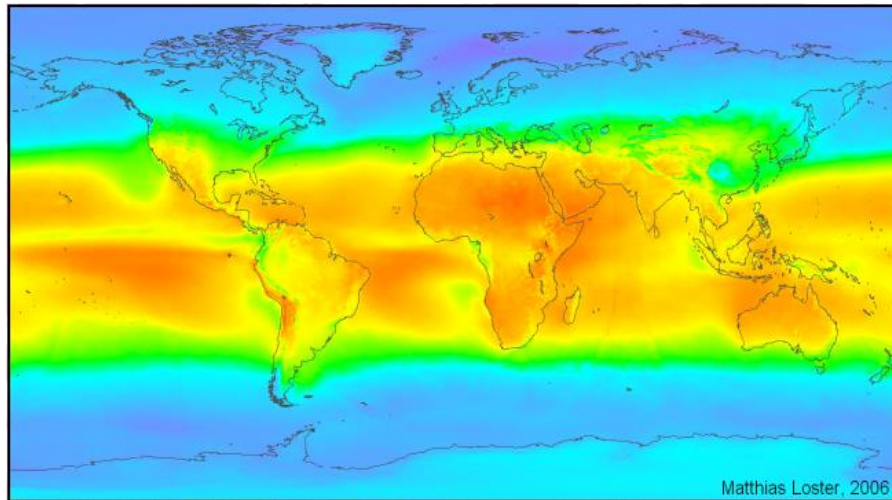


Imagen 6: Distribución de  $W/m^2$  en la superficie de la tierra

Fuente: [http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind1/Tema\\_3/solar.html](http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind1/Tema_3/solar.html)

La imagen anterior muestra la distribución de irradiancia ( $W/m^2$ ) a lo largo de la superficie de la tierra, donde se pueden apreciar que las zonas que tienen menor irradiancia adquieren un tono azulado y aquellas donde la irradiancia es mayor varían desde un tono verdoso hasta un tono rojizo donde la irradiancia alcanza valores máximos.

La conversión de luz en energía eléctrica se realiza por medio de los **Paneles Solares Fotovoltaicos**: placas que suelen estar hechas de silicio cristalino y que por su composición convierten la luz del sol en electricidad gracias al efecto fotoeléctrico que se ha explicado anteriormente. Están compuestos de células solares, también denominadas indistintamente como celdas solares o células fotovoltaicas.

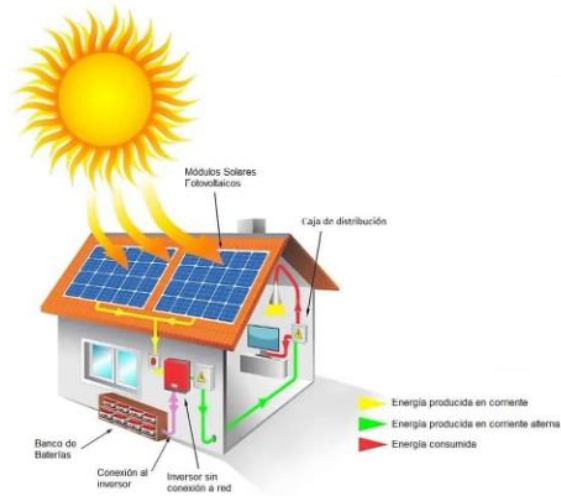


Imagen 7: Instalación fotovoltaica de uso en el hogar

Fuente: <https://solartik.ar/energia-solar-fotovoltaica-paneles-solares/>

## 1.6 CÉLULA SOLAR

### ESTRUCTURA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA

La estructura simplificada de una célula fotovoltaica se muestra en ella podemos apreciar los principales elementos o secciones que la conforman. A continuación, se da una breve definición de cada uno de estos elementos [5]:

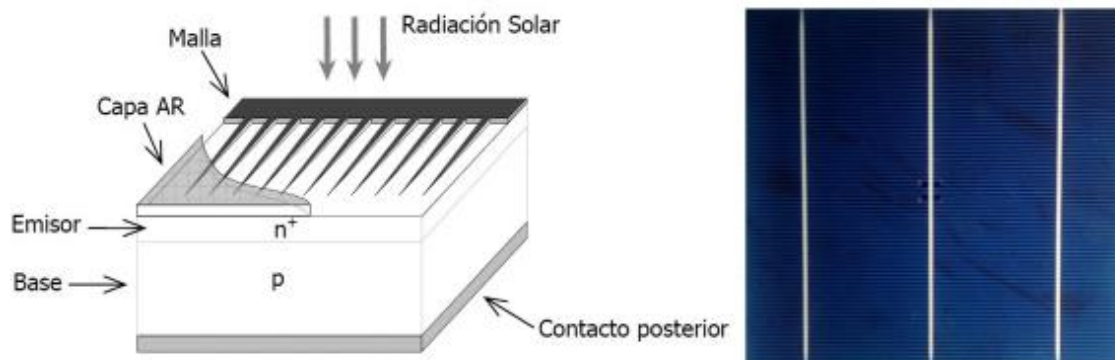


Imagen 8: Estructura célula solar

Fuente: Asignatura de electrónica de potencia de sistemas de energía alternativa

- Una **capa antireflexiva** (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. El espesor y el índice de refracción de esta capa se diseñan de forma que la reflectancia sea mínima para ciertas longitudes de onda y en un intervalo lo más amplio posible del espectro solar. Además de estas capas, muchas células presentan superficies dotadas de surcos, micropirámides y otras texturas creadas para reducir aún más las pérdidas por reflexión.
- Una **malla de metalización**, pero que puede presentar formas diversas. El diseño de esta malla de metalización es crítico puesto que debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible al interior del dispositivo.

Su parámetro más característico es el factor de sombra,  $F_s$ , que mide la cantidad de superficie ocupada por los dedos metálicos respecto al área total del dispositivo.

- Las **capas activas** de material semiconductor, en el que distinguimos entre las dos regiones que forman la unión p – n. Habitualmente, estas capas activas aparecen depositadas o crecidas sobre un sustrato más grueso que confiere mayor resistencia mecánica al conjunto. Además del tipo y la calidad del semiconductor empleados, el espesor de las capas y la densidad o concentración de impurezas influyen notablemente en el rendimiento final de la célula.
- El **contacto metálico posterior**, que suele realizarse metalizando toda la superficie del dispositivo cuando no existe el requisito de que ésta reciba luz por su parte posterior.

A partir de esta estructura básica, las células solares han sufrido numerosas modificaciones e innovaciones con el fin de conseguir mayores eficiencias de conversión. Por ejemplo, el caso de algunas células de concentración o algunas realizadas con tecnologías de lámina delgada, dispositivos más sofisticados pueden presentar más de una unión en su estructura (dispositivos tándem o multiunión), o una o varias uniones p-n formadas por distintos materiales

semiconductores (dispositivos de heterounión). Aparecen además capas adicionales para mejorar el crecimiento de las secciones activas sobre un sustrato, acoplar constantes de red entre distintos materiales, permitir el crecimiento de unas células sobre otras, transferir portadores de carga de una a otra sección sin pérdidas, etc...

## 1.7 PANELES SOLARES

Son dispositivos que captan la energía de la radiación solar para su aprovechamiento. Están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad y suelen fabricarse con silicio cristalino o arseniuro de galio (específicamente para uso fotovoltaico).



Imagen 9: Panel solar fotovoltaico

Fuente: <https://computerhoy.com/noticias/life/desentrañan-misterio-fotosíntesis-permitirá-optimizar-paneles-solares-577147>

Ahora que hemos mejorado en el control de la tecnología de producción debido al desarrollo en microelectrónica, transistores, procesadores y dado que el silicio gracias a sus propiedades tanto físicas como químicas (abundante, económico, producción de uniones p-n en un rango de espectro solar de gran emisión), favorecen el efecto fotovoltaico, este es el material que se usa más para la fabricación de las células.

Dichas células se pueden dividir en tres subcategorías:

1. **Células de silicio monocristalino** constituidas por un único cristal de silicio, presentan un color azul oscuro uniforme
2. **Células de silicio policristalino** constituidas por un conjunto de cristales de este material, lo que provoca que tengan un rendimiento algo inferior frente a las monocristalinas. Se caracterizan por un color azul más intenso.
3. **Células de silicio amorfo** menos eficientes que las anteriores, pero más económicas.

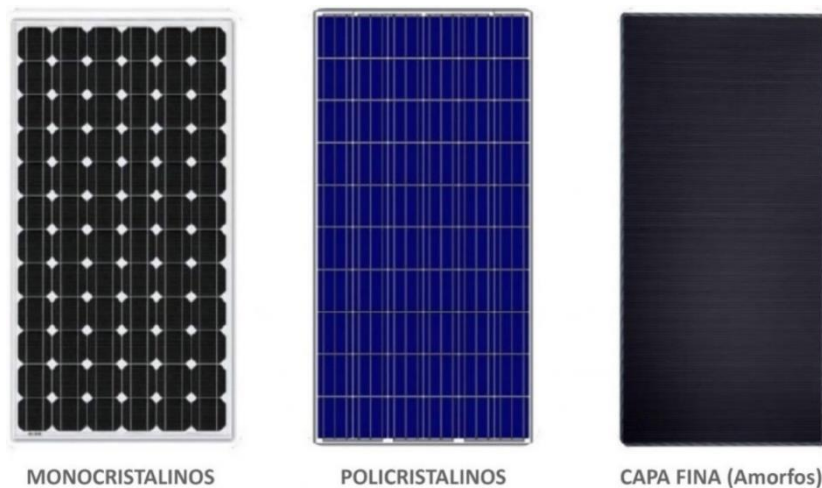


Imagen 10: Tipos de paneles fotovoltaicos con sus respectivas células

Fuente: <https://ecofener.com/blog/tipos-de-paneles-solares/>

## 1.8 TIPOS DE INSTALACIONES

Una instalación solar fotovoltaica (ISFV) es el conjunto de elementos destinados a convertir la radiación solar en energía eléctrica por medio de las placas o paneles solares fotovoltaicos [6].

Estas instalaciones pueden estar conectadas a la red eléctrica, para vender la energía producida, o pueden ser para autoconsumo (aisladas de la red).

## INSTALACIÓN DE AUTOCONSUMO

Se emplean en localidades lejanas, que no tienen acceso a la red pública: instalaciones rurales, iluminación de áreas aisladas, telecomunicaciones, balizas o boyas de señalización y bombeo de agua. Estas instalaciones posibilitan dos tipos de suministros según sea el tipo de distribución:

### • El sistema centralizado

Consiste en un único gran sistema que cubre las necesidades de un conjunto de usuarios. La ventaja es disminuir los costos del sistema manteniendo la calidad del suministro.

### • El sistema descentralizado

Consiste en la instalación de un sistema individual completo en cada vivienda para cubrir sus necesidades; al contrario del anterior, este tiene un mayor costo.

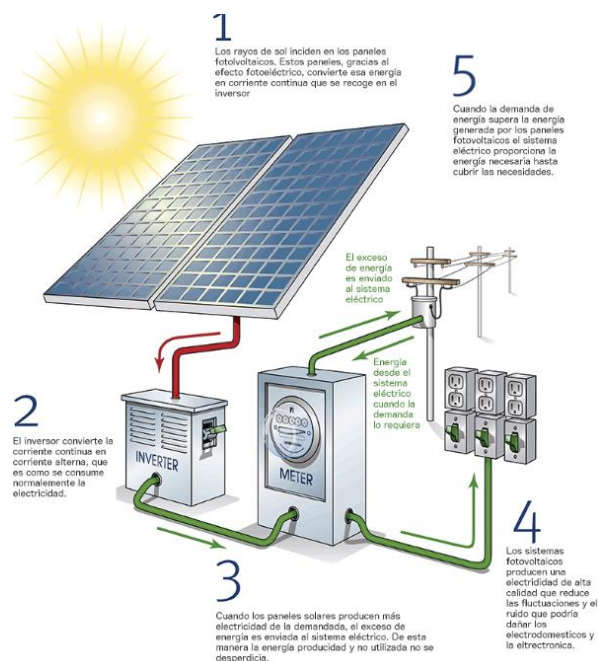


Imagen 11: Instalación de autoconsumo

Fuente: <https://www.helioesfera.com/como-funciona-un-sistema-fotovoltaico-de-a-utocconsumo/>

## 1.8 INSTALACIÓN RED ELÉCTRICA

En este caso, la red pública actúa como un disipador de energía infinita y acepta toda la energía disponible del sistema fotovoltaico, tanto de centrales fotovoltaicas como de los instalados en viviendas y edificios.

Este sistema requiere de condiciones de funcionamiento diferentes a la solución aislada, no necesita de subsistema de almacenamiento, y el sistema de regulación cumple la función de indicar al inversor de energía la disponibilidad en cada momento en los paneles (el punto de máxima potencia); este sistema conlleva, además, un beneficio económico: "huertos solares".

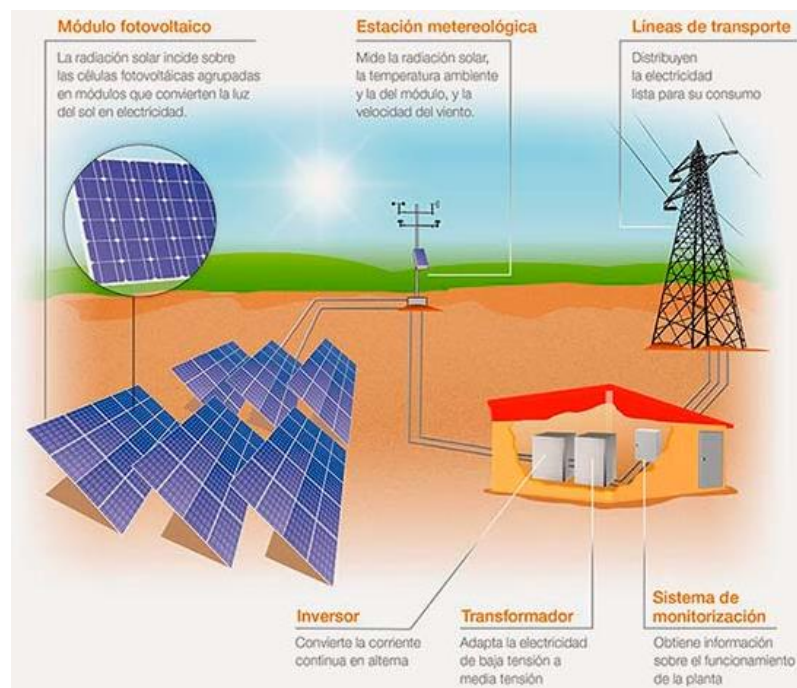


Imagen 12: Instalación red eléctrica

Fuente: <https://www.greentech.es/la-energia-solar-todo-sobre-ella/>



## METODOLOGÍA

### 2. OBJETIVOS Y EQUIPO UTILIZADO

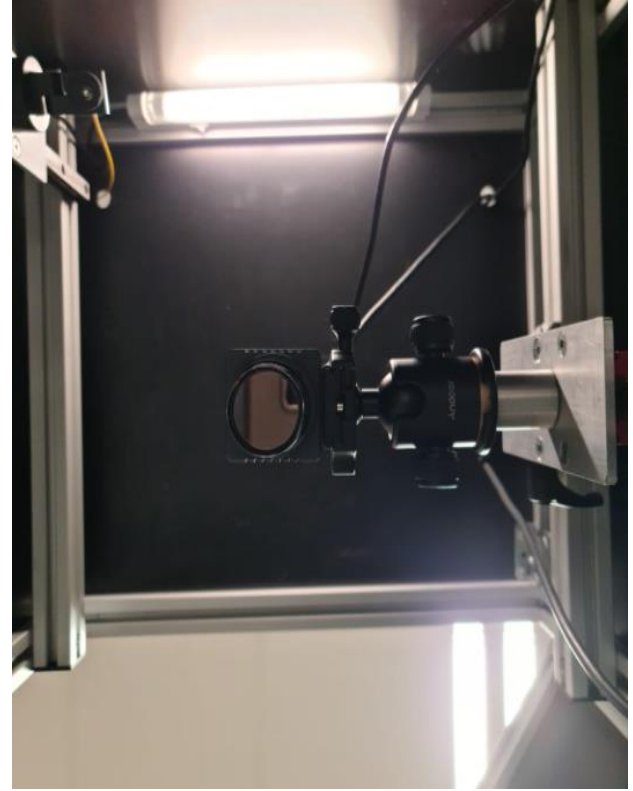
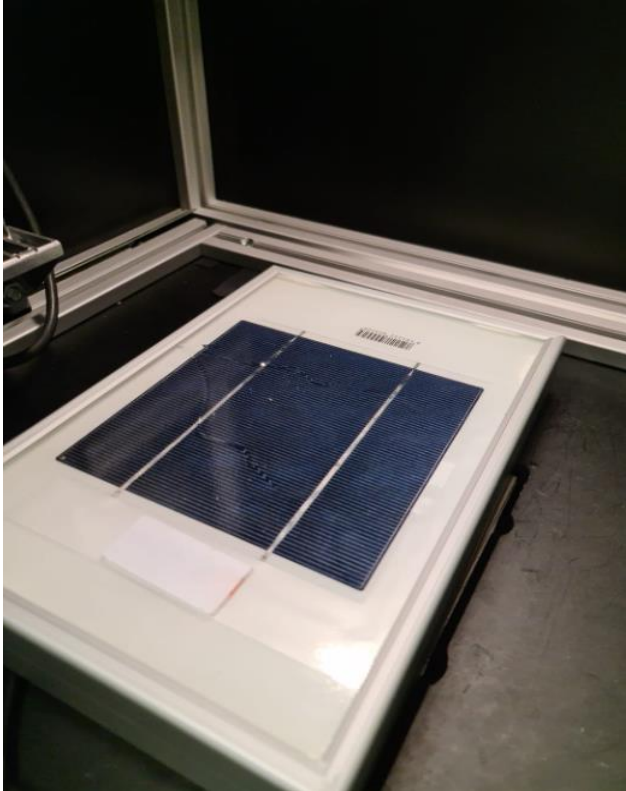
El objetivo de este trabajo es automatizar en la medida de lo posible el proceso de obtención de imágenes de los ensayos de fotoluminiscencia y electroluminiscencia, reduciendo la manipulación de los equipos por acción humana para que de esta manera se mejoran las condiciones de trabajo personal y se facilita el proceso de obtención de datos y resultados con mayor rapidez.

Los componentes que se han utilizado en todo el proyecto son los siguientes: Para la toma de medidas e imágenes se ha utilizado el armario de la imagen 13 en cuyo interior se encuentran los soportes para la cámara, así como el diodo láser y la célula solar la cual se usará.



Imagen 13: Vista exterior e interior de la estación de trabajo

Para realizar las pruebas el habitáculo de la cámara estará a oscuras para poder ver correctamente las imágenes, el fluorescente solo estará encendido para cuando se tenga que cambiar la cámara o la oblea de silicio.



*Imagen 14: Vista de la oblea de silicio y de la cámara en su posición de operación*

## 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Se ha usado una fuente de alimentación modelo CPX400DEP de AimTTi.



Imagen 15: Vista frontal de la fuente de alimentación



Imagen 16: Vista trasera de la fuente de alimentación

Para lograr un alto grado de flexibilidad para las aplicaciones de control remoto, la fuente de alimentación está equipada con interfaces RS-232, USB, GPIB y Lan (Ethernet) como estándar.

El diseño Powerflex ofrece una capacidad de potencia constante que permite corrientes de salida más altas a voltajes de salida más bajos. Cada salida puede proporcionar 60V a una corriente máxima de 7A. A medida que se reduce el ajuste de voltaje, la capacidad de corriente de salida aumenta hasta un máximo de 20 A.

El CPX400DEP es una fuente de doble salida con dos salidas independientes y aisladas, cada una con una capacidad de 420W. Las salidas operan en modo de voltaje o corriente constantes con cruce automático e indicación de modo. El seguimiento de voltaje aislado permite un control fácil para el cableado en serie o en paralelo, lo que permite producir hasta 120 V o 40 A.

Se utilizan controles analógicos, pero las fuentes de alimentación incorporan una función de bloqueo "S" que transfiere el control de voltaje y corriente de los controles analógicos al circuito digital interno para mayor estabilidad y seguridad.

Cada salida tiene su propio interruptor de encendido/apagado, pero se puede usar un interruptor de encendido/apagado síncrono adicional para garantizar que ambas salidas funcionen juntas.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL DIODO LÁSER



Imagen 17: Vista frontal del sistema del diodo láser



Imagen 18: Vista trasera del sistema de diodo láser

BWT Beijing proporciona un sistema completo de diodo láser adecuado para el procesamiento de materiales, la terapéutica médica y el bombeo de medios láser de estado sólido.



Imagen 19: Sistema de sujeción para el haz diodo láser

Entregando hasta 50 W de láser de diodo en una fibra de núcleo de  $100 \sim 400 \mu\text{m}$ , el sistema facilita el desarrollo de nuevas aplicaciones. Con control sobre la temperatura de funcionamiento del láser de diodo, así como el ancho de corriente y pulso, el sistema ofrece flexibilidad y una interfaz fácil de usar.

El sistema puede ser controlado por la interfaz de usuario del panel frontal o por una interfaz RS-232 controlada por computadora.

Características:

1. Hasta 300 W de potencia de salida
2. Refrigeración por aire
3. Entrega de fibra
4. Haz de mira rojo (aiming)
5. Control de temperatura
6. Diseño compacto

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA DIGITAL

Para esta aplicación usaremos una cámara *InGaAs* modelo C14041-10U de la empresa japonesa *Hamamatsu photonic*.

El uso de esta cámara se debe a sus aplicaciones y características que ofrece:

#### **CARACTERÍSTICAS**

- Alta sensibilidad en la región del infrarrojo cercano 320 × 256 píxeles
- Bajo nivel de ruido y alta estabilidad con refrigeración
- Modo de obturador rodante de alta calidad de imagen y el modo de obturador global capaz de exposición a toda la pantalla montada
- Velocidad de fotogramas de aprox. 216 fotogramas/s (modo de persiana enrollable).

#### **APLICACIONES**

- Inspecciones internas de obleas y dispositivos de silicio.
- Evaluación de celdas solares.
- Evaluación y análisis de dispositivos de comunicación óptica.
- Adquisición de imágenes EL/PL.



Imagen 20: Cámara C14041-10U



Imagen 21: Lente para captar las imágenes de PL y EL

Usaremos un adaptador Sony DC-700 para la cámara como fuente de alimentación. Su principal ventaja es su pequeño tamaño su bajo peso, lo que facilita el transporte. Ofrece compatibilidad con todas las videocámaras y accesorios, proporciona además conversión de alimentación CA/CC.



Imagen 22: Vista frontal fuente alimentación



Imagen 23: Vista trasera fuente alimentación



## 3. APLICACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN

Como expliqué anteriormente, para el desarrollo de este programa he utilizado el lenguaje de programación *Python* ya que para este caso me ha ofrecido mejores opciones para su desarrollo. Esto es debido a que *Python* ofrece múltiples funciones y bibliotecas para el desarrollo de aplicaciones con interfaces para que a los usuarios que las empleen les resulte más sencillo comprender su funcionamiento. Dicha aplicación consta de varias partes de las cuales pasaré a explicar y desarrollar a continuación.

### 3.1 PHYTON

*Python* es un lenguaje de programación ampliamente utilizado en las aplicaciones web, el desarrollo de software, la ciencia de datos y el machine learning (ML).

Los desarrolladores utilizan *Python* porque es eficiente y fácil de aprender, además de que se puede ejecutar en muchas plataformas diferentes. El software *Python* se puede descargar gratis, se integra bien a todos los tipos de sistemas y aumenta la velocidad del desarrollo.

#### 3.1.1 ORIGEN

*Python* fue creado en 1991 por el informático holandés Guido van Rossum en el Centro para las Matemáticas y la Informática (CWI, Centrum Wiskunde & Informatica), en los Países Bajos, como un sucesor del lenguaje de programación ABC, capaz de manejar excepciones e interactuar con el sistema operativo Amoeba [7].

El nombre del lenguaje proviene de la afición de su creador por los humoristas británicos *Monty Python*.

#### 3.1.2 BENEFICIOS DE PHYTON FRENTE A OTROS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

- Los desarrolladores pueden leer y comprender fácilmente los programas de *Python* debido a su sintaxis básica similar a la del inglés.
- *Python* permite que los desarrolladores sean más productivos, ya que pueden escribir un programa de *Python* con menos líneas de código en comparación con muchos otros lenguajes.

- *Python* cuenta con una gran biblioteca estándar que contiene códigos reutilizables para casi cualquier tarea. De esta manera, los desarrolladores no tienen que escribir el código desde cero.
- Los desarrolladores pueden utilizar Python fácilmente con otros lenguajes de programación conocidos, como Java, C y C++.
- La comunidad activa de *Python* incluye millones de desarrolladores alrededor del mundo que prestan su apoyo. Si se presenta un problema, puede obtener soporte rápido de la comunidad.
- Hay muchos recursos útiles disponibles en Internet si desea aprender Python. Por ejemplo, puede encontrar con facilidad videos, tutoriales, documentación y guías para desarrolladores.
- Python se puede trasladar a través de diferentes sistemas operativos de computadora, como Windows, macOS, Linux y Unix.

### 3.1.3 APLICACIONES PARA SU USO

El lenguaje *Python* se aplica a varios casos de uso en el desarrollo de aplicaciones, incluidos los ejemplos siguientes [8]:

#### **Desarrollo web del lado del servidor**

El desarrollo web del lado del servidor incluye las funciones complejas de backend que los sitios web llevan a cabo para mostrar información al usuario. Por ejemplo, los sitios web deben interactuar con las bases de datos, comunicarse con otros sitios web y proteger los datos cuando se los envía a través de la red.

*Python* es útil para escribir código del lado del servidor debido a que ofrece muchas bibliotecas que constan de código preescrito para crear funciones de backend complejas. Los desarrolladores también utilizan un amplio rango de marcos de *Python*

que proporcionan todas las herramientas necesarias para crear aplicaciones web con mayor rapidez y facilidad.

Por ejemplo, los desarrolladores pueden crear la aplicación web esqueleto en segundos porque no deben escribirla desde cero. Pueden probarla por medio de las herramientas de prueba del marco, sin depender de herramientas de prueba externas.

## Automatización con scripts de *Python*

Un lenguaje de scripting es un lenguaje de programación que automatiza las tareas que suelen llevar a cabo las personas. Los programadores utilizan ampliamente los scripts de *Python* para automatizar muchas tareas diarias, como las siguientes:

- Cambiar el nombre de una gran cantidad de archivos a la vez
- Convertir un archivo en otro tipo de archivo
- Eliminar palabras duplicadas de un archivo de texto
- Llevar a cabo operaciones matemáticas básicas
- Enviar mensajes por email
- Descargar contenido
- Efectuar análisis básicos de registros
- Encontrar errores en varios archivos

## Realizar tareas de ciencia de datos y machine learning

La consiste en extraer conocimientos valiosos a partir de los datos, mientras que el enseña a las computadoras a aprender automáticamente de los datos y a efectuar predicciones precisas. Los científicos de datos utilizan *Python* para realizar tareas de ciencia de datos, como las que se indican a continuación:

- Corregir y eliminar datos incorrectos, lo que se conoce como limpieza de datos
- Extraer y seleccionar varias características de los datos que consiste en agregar nombres significativos a los datos
- Buscar diferentes estadísticas a partir de los datos
- Visualizar los datos mediante el uso de tablas y gráficos, como los gráficos de líneas, los de barras, los circulares y los histogramas

Los científicos de datos utilizan las bibliotecas de ML de *Python* para entrenar los modelos de ML y crear clasificadores que clasifiquen los datos con precisión. Las personas que trabajan en diferentes campos utilizan clasificadores basados en *Python* para efectuar tareas de clasificación, como la clasificación de imágenes, texto y tráfico de red; el reconocimiento de habla; y el reconocimiento facial.

También utilizan *Python* para las tareas de aprendizaje profundo, una técnica avanzada de ML.

### **Desarrollo de software**

Los desarrolladores de software suelen utilizar *Python* para realizar distintas tareas de desarrollo y aplicaciones de software, como las que se indican a continuación:

- Realizar un seguimiento de los errores en el código del software
- Crear el software de forma automática
- Administrar los proyectos de software
- Desarrollar prototipos de software
- Desarrollar aplicaciones de escritorio por medio de las bibliotecas de interfaz gráfica de usuario (GUI)
- Desarrollar juegos simples basados en texto a videojuegos más complejos

### **Automatización de pruebas de software**

La prueba de software es el proceso de verificar si los resultados reales del software coinciden con los resultados esperados, para garantizar que el software esté libre de errores.

- Los desarrolladores utilizan marcos de prueba de unidad de *Python*, como *Unittest*, *Robot* y *PyUnit*, para probar las funciones que escriben.
- Los encargados de probar el software utilizan *Python* para escribir casos de prueba para diversos escenarios de prueba. Por ejemplo, lo utilizan para probar la interfaz de usuario de una aplicación web, los diversos componentes de software y las nuevas características.

Los desarrolladores pueden utilizar varias herramientas para ejecutar scripts de prueba de manera automática. Estas herramientas se conocen como herramientas de integración e implementación continuas (CI/CD). Los encargados de probar el software y sus desarrolladores utilizan las herramientas de CI/CD, como Travis CI y Jenkins, para automatizar las pruebas. La herramienta de CI/CD ejecuta automáticamente los scripts de prueba de *Python* e informa los resultados de las pruebas cada vez que los desarrolladores presentan nuevos cambios de código.

## 3.2 FUNCIONAMIENTO APLICACIÓN

Una vez iniciada la aplicación entraremos en la pantalla principal desde donde realizaremos todo el control de la instalación. Las pautas que debemos seguir para trabajar con ella son las siguientes:

1. **Conexión puerto serie.** Seleccionaremos los puertos COM desde donde los distintos aparatos están conectados al portátil u ordenador. Si no hacemos esto previamente la aplicación no podrá realizar correctamente su función.
2. **Control de electroluminiscencia (CONTROL EL).** Si queremos controlar la intensidad que recibe la fotocélula por la fuente de alimentación, usaremos este método.
- 2". **Control de fotoluminiscencia (CONTROL PL).** Si queremos controlar la intensidad que recibe la fotocélula por el láser, usaremos este método.
3. **Salir.** Una vez hayamos realizado todas las pruebas y obtenido todos los resultados que queramos, cerraremos la aplicación.

### 3.3 PANTALLA PRINCIPAL

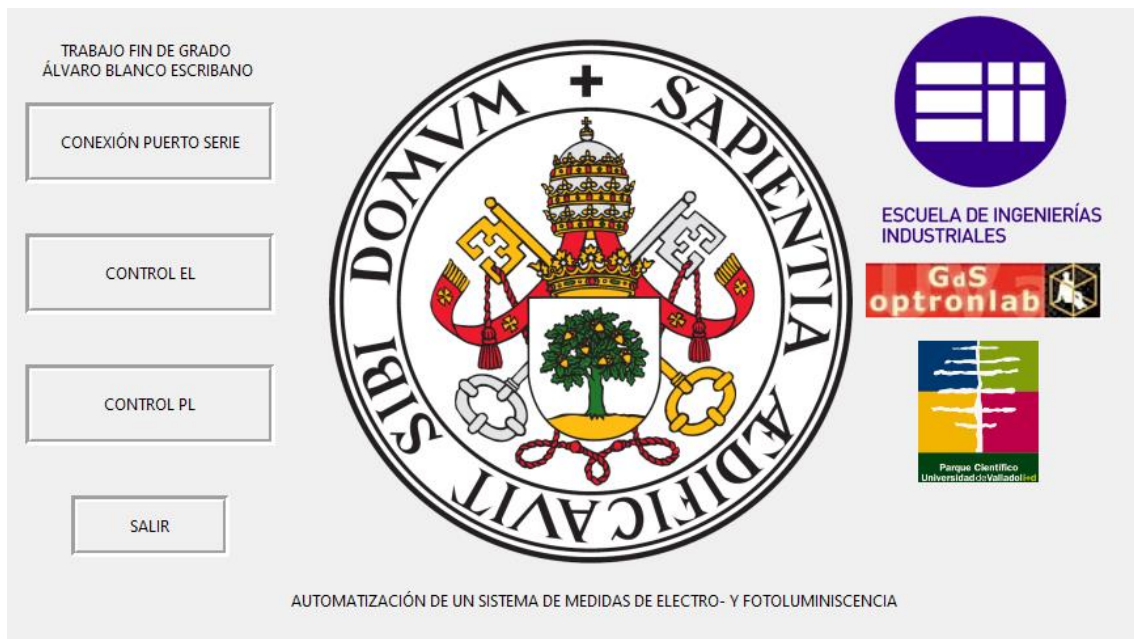


Imagen 24: Pantalla principal de la aplicación

Desde esta pantalla podremos acceder al resto de funcionalidades de la aplicación para y realizar las pruebas, medidas y ver el estado de la instalación sin que el operario tenga que manipularla manualmente o que tenga que estar muy próximo a ella.

Según vayamos seleccionando las distintas funcionalidades de la aplicación irán ocupando secciones en la pantalla para poder tener un control global desde una única pantalla en vez de ir abriendo ventanas emergentes a mayores y que después tenemos que ir cerrando una a una

### 3.4 CONEXIÓN PUERTO SERIE

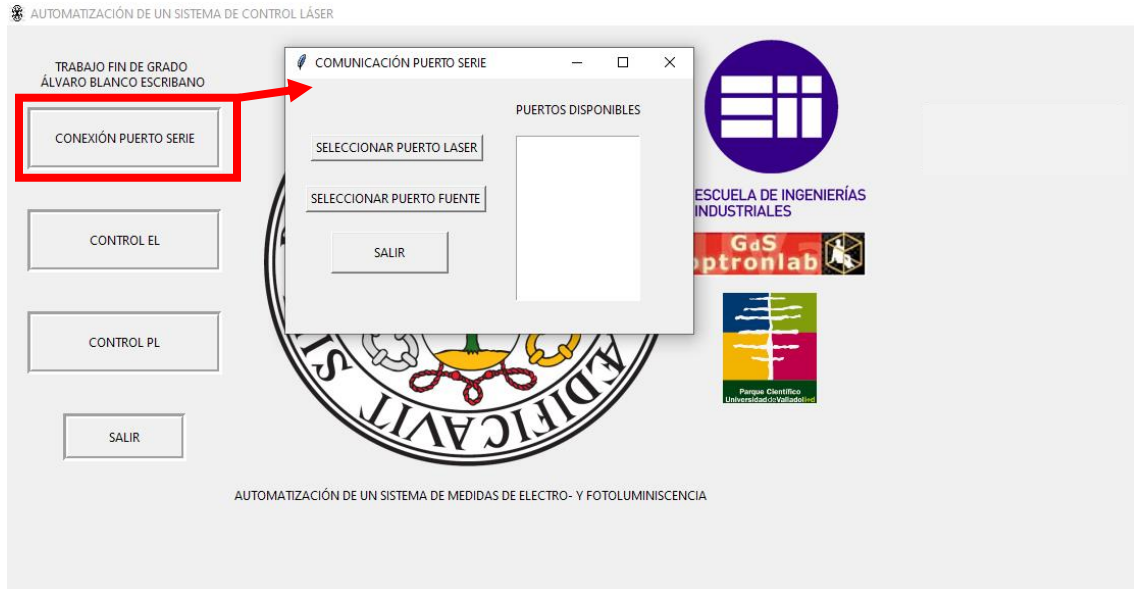


Imagen 25: Pantalla principal de la aplicación. Ventana selección puerto serie

Según el número de puertos COM ocupados aparecerán en forma de lista en el recuadro blanco de la ventana emergente "COMUNICACIÓN PUERTO SERIE".

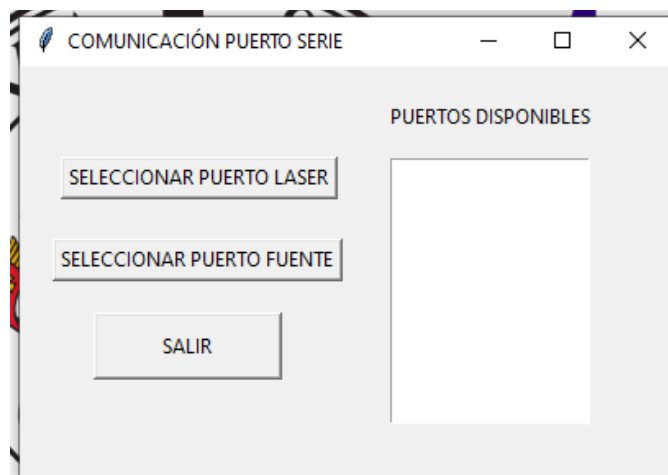


Imagen 26: Ventana selección puerto serie

Como para este caso solo conectaremos una fuente y un diodo láser, aparecerán dos puertos. Para seleccionarlo pulsaremos en la lista el puerto que queremos y a continuación, seleccionaremos si es del puerto del diodo láser (**Seleccionar puerto láser**) o de la fuente de alimentación (**Seleccionar puerto fuente**)

Si el puerto seleccionado corresponde correctamente con el dispositivo que queremos, el selector correspondiente se tornará en verde, en caso contrario se tornará rojo y permanecerá así hasta que seleccionemos el correcto.

Una vez los dos puertos estén seleccionados correctamente pulsamos en "**SALIR**", la ventana se cerrará y podremos continuar desde la pantalla principal.

### 3.5 CONTROL ELECTROLUMINISCENCIA

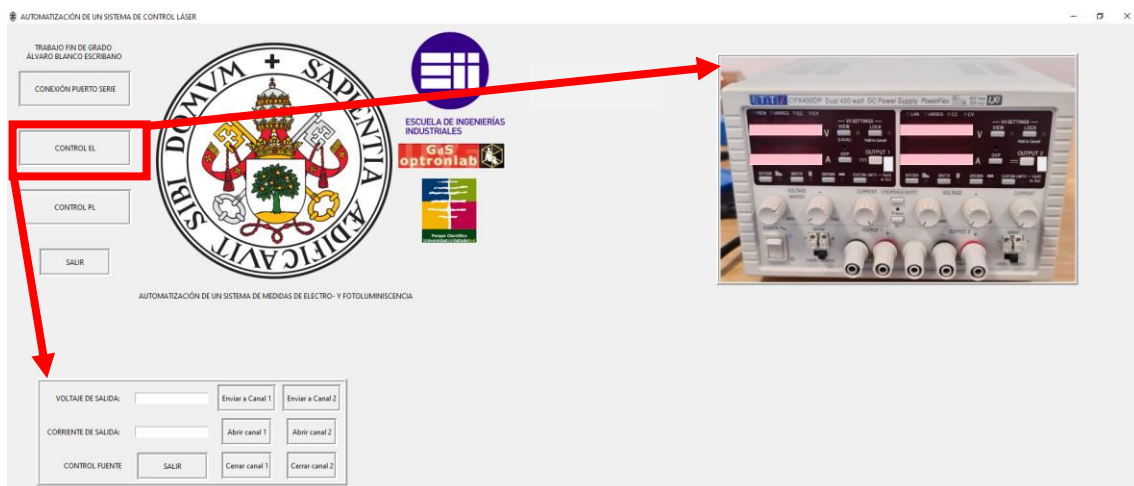


Imagen 27: Pantalla principal de la aplicación. Método control por fuente

Seleccionando este método observaremos los efectos de la fotocélula mediante la fuente de alimentación. Para ello introduciremos el voltaje y la corriente que queremos suministrar desde la misma en el mando de control y se lo enviaremos a la fotocélula.



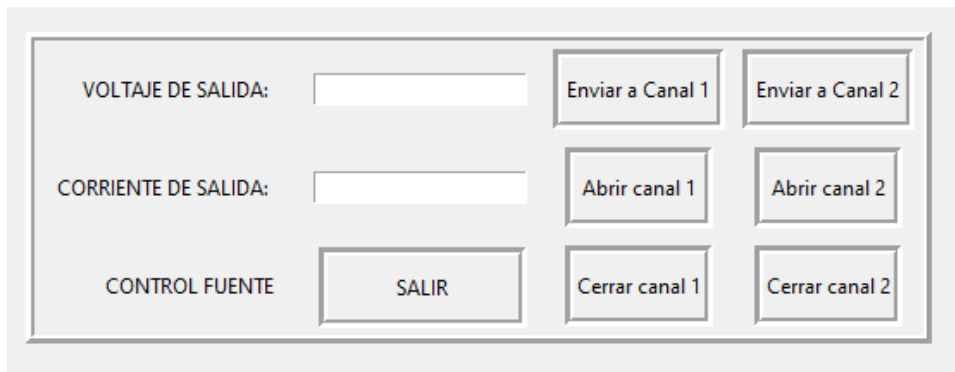


Imagen 28: Mando de control de la fuente de alimentación

Una vez introducidos los valores que queremos, pulsaremos en el botón "Enviar a Canal 1" o "Enviar a Canal 2", según el canal de la fuente que queremos usar. Después en el botón "Abrir" correspondiente al canal y con ello la fuente suministrará a la fotocélula el voltaje y amperaje. Estos valores pueden ser visualizados en la pantalla, así como si el canal está abierto o cerrado



Imagen 29: Visualización estado de la fuente de alimentación

Una vez realizadas todas las pruebas cerraremos el canal y pulsaremos en "SALIR" para cerrar el control EL-.

### 3.6 CONTROL FOTOLUMINISCENCIA



Imagen 30: Pantalla principal de la aplicación. Método control por diodo láser

Seleccionando este método observaremos los efectos de la fotocélula mediante el diodo láser. Para ello introduciremos la potencia que queremos suministrar desde la mismo en el mando de control y se lo enviaremos a la fotocélula.

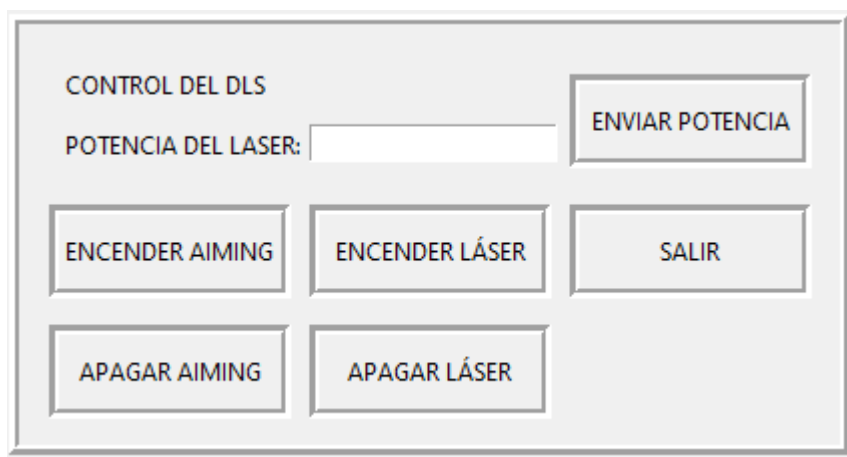


Imagen 31: Mando de control del diodo láser

Una vez introducidos los valores que queremos, pulsaremos en el botón "Enviar potencia". Después pulsaremos el botón "Encender láser" y una vez queramos terminar, pulsaremos en "Apagar láser" y después "Salir".

Aparte de seleccionar la potencia que queremos suministrar podemos elegir la zona en la que queremos que vaya el láser.

Para ello es necesario que antes de encender el láser lo hayamos ajustado mecánicamente y con la ayuda del "Aiming" el láser apunte hacia dónde queremos.

Sin haber enviado potencia al láser seleccionaremos "Encender aiming", el diodo proyectará un haz de luz que nos indicará donde irá el láser y de esta manera ayudarnos a la hora de ajustar su posición mecánicamente.

Tanto la potencia suministrada como el estado del láser (apagado o encendido) y el estado del aiming (encendido o apagado) pueden ser visualizados por pantalla.



Imagen 32: Visualización estado del diodo láser

Una vez realizadas todas las pruebas, pararemos la emisión pulsando en "Apagar láser" y después en "SALIR" para cerrar el control del láser.

### 3.7 HIPIC

Para la captura de imágenes se ha usado *HIPIC* que es un software desarrollado por la empresa japonesa *Hamamatsu* para aplicaciones físicas e industriales. Al ser compatible con nuestra cámara se ha decidido usar, además de varias ventajas que ofrece dicho software.

#### Características

- Compatibilidad total con todas las cámaras monocromáticas de Hamamatsu.
- Compatibilidad completa con todos los paneles planos de rayos X, sensores de línea de rayos X, sensores TDI de rayos X y tubos MFX.
- Gama ampliada de cámaras y capturadores de fotogramas mediante módulos de controladores internos (por ejemplo, cámaras de vídeo analógicas y cámaras TDI).
- Soporte de mini espectrómetros.
- Soporte de intensificadores de imagen.
- Control de todas las funciones de la cámara.
- Soporte a largo plazo de hardware heredado, máxima garantía de por vida.
- Soporte de cámara definible libremente a través del módulo GenericCam.
- Adquisición de secuencias a alta velocidad de fotogramas.
- Conjunto de funciones de disparo para una perfecta sincronización con dispositivos externos.

#### Aplicaciones

- imágenes de rayos X.
- Espectroscopia.
- Imágenes de fluorescencia y luminiscencia.
- conteo de fotones.
- Imágenes de semiconductores.
- Lectura del centellador.
- Imágenes de alta velocidad.

### 3.7.1 CAPTURA DE IMÁGENES

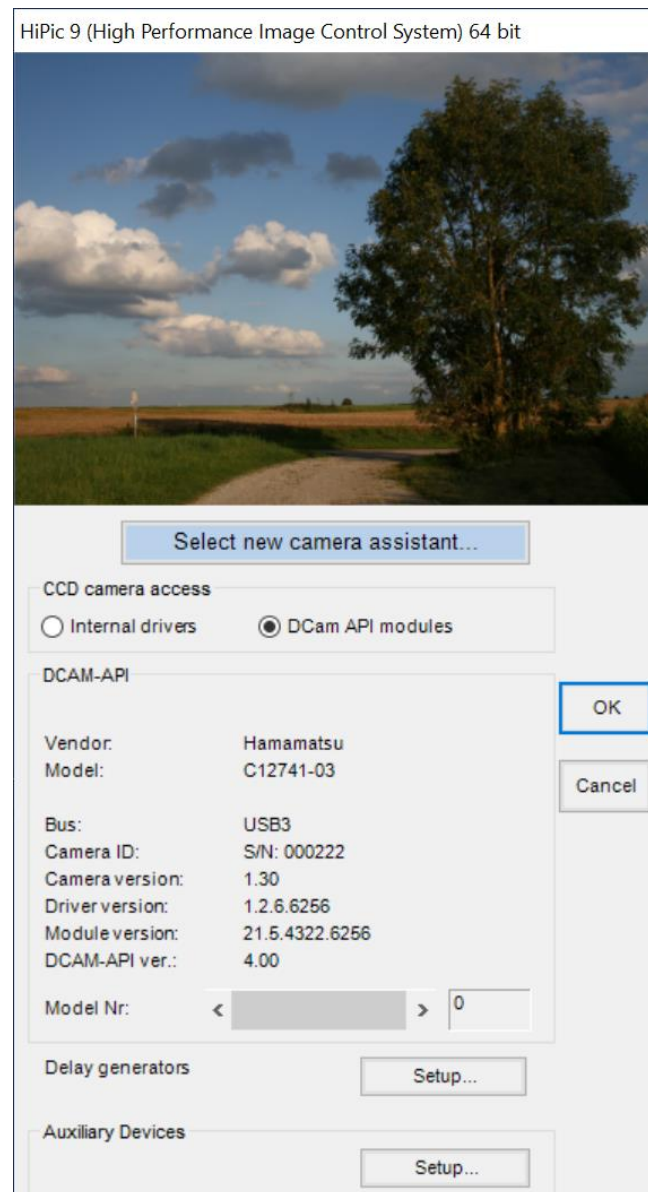


Imagen 33: Pantalla de inicio de Hipic

Al abrir la aplicación nos aparecerá la pantalla inicial de *Hipic*, como podemos ver en la imagen anterior. Para conectarnos con la cámara que utilizemos seleccionaremos la opción "**DCam API modules**" en el apartado "**CCD camera acces**". Hecho esto pulsaremos en "**OK**" y entraremos a al menú de la aplicación donde pasaremos al entorno *Hipic*.

Desde esta pantalla realizaremos las capturas de las imágenes de la célula solar para los experimentos de fotoluminiscencia y electroluminiscencia.

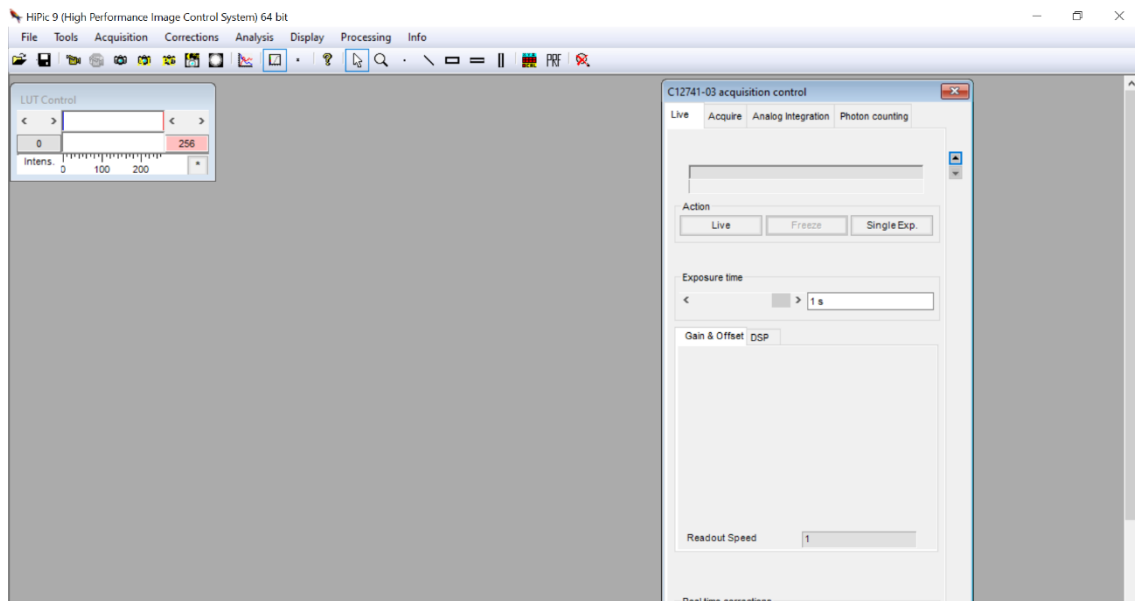


Imagen 34: Pantalla de principal de Hipic

HiPic nos ofrece varias opciones para tomar muestras (*live mode*, *acquire mode*, *analog integration mode*, *sequence mode* y *streaming mode*), pero para nuestro caso solo usaremos un modo, el *Live*.

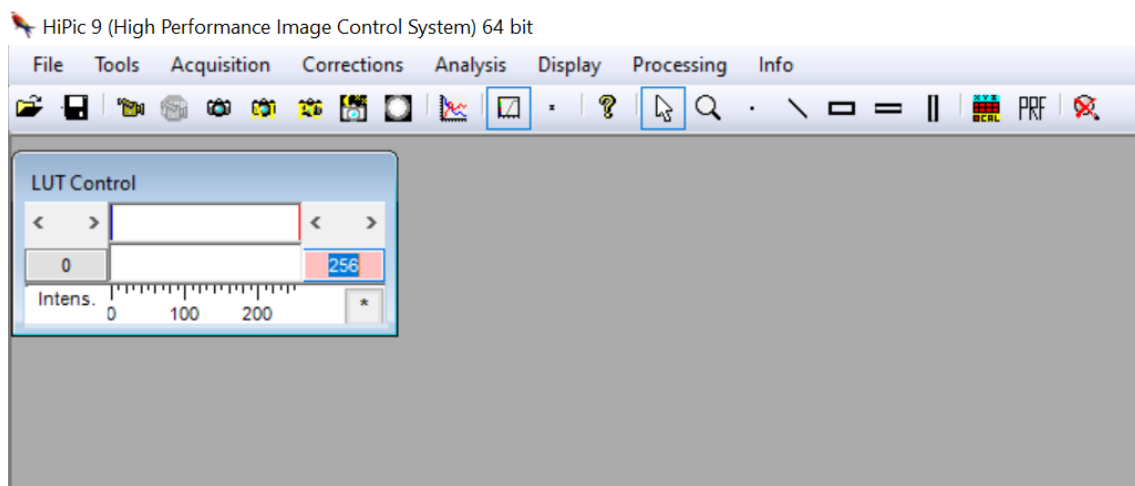


Imagen 35: Herramientas de Hipic

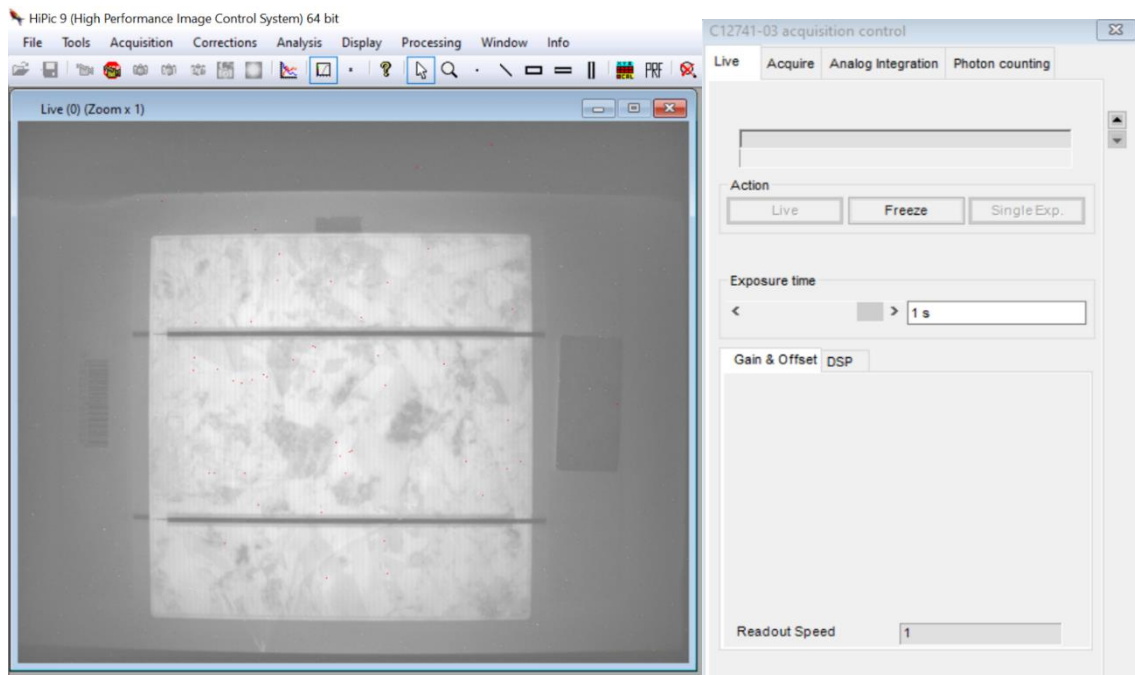


Imagen 36: Vista de la captura de la célula solar

Para observar la célula desde la aplicación usaremos el modo **"Live"**. Una vez hecho esto *Hipic* procederá a mostrarnos una imagen en tiempo real de lo que esté enfocando la cámara, en este caso nuestra célula solar. Podemos apreciarlo en la imagen anterior.

Ajustando el tiempo de exposición mejoraremos la visualización de la imagen para obtener unas imágenes de mejor calidad, en este caso he usado 1 segundo de tiempo de exposición. La captura de la imagen se realiza pulsando en **"Freeze"**, *Hipic* pasará a mostrarnos el mensaje de que la selección actual no está guardada y si queremos guardarla, si la imagen que hemos obtenido es buena la guardaremos y si no lo es tendremos que repetir la captura.

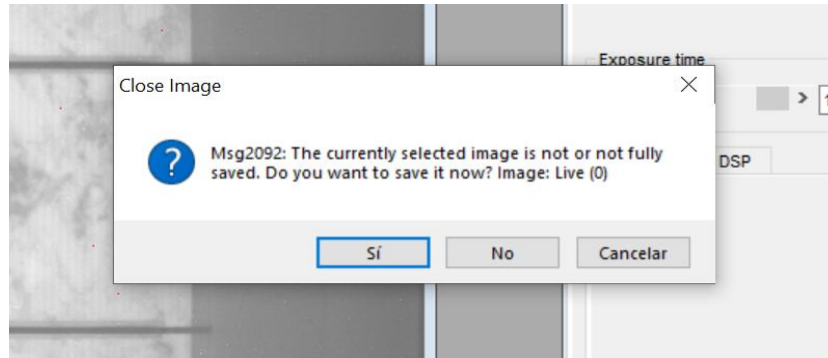


Imagen 37: Mensaje de Hipic para guardar la captura

Una vez hayamos guardado la imagen seleccionaremos la carpeta donde queremos mandarla, la dejaremos en formato .tif para trabajar en FIJI. Se han realizado varias capturas con distintas medidas y obtener mejores conclusiones de la funcionalidad de la aplicación.

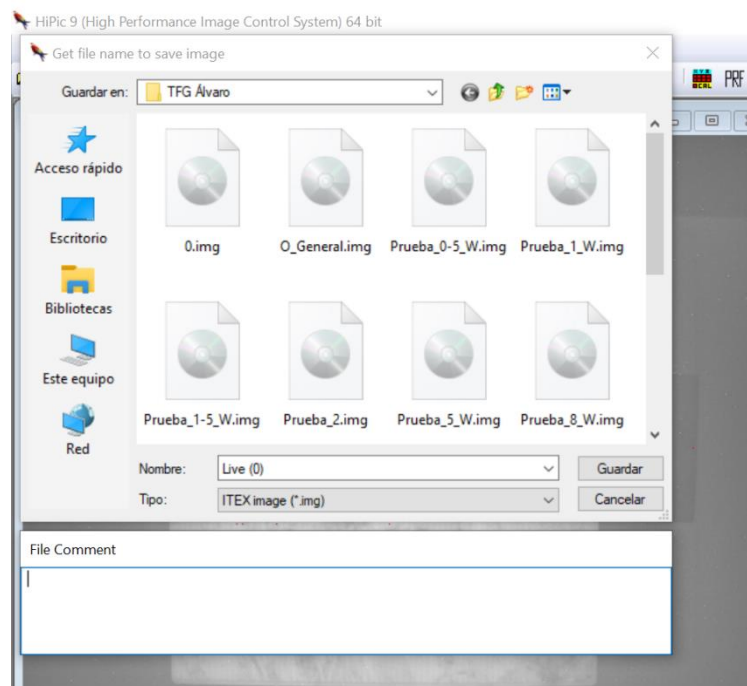


Imagen 38: Carpeta de capturas de Hipic



## 4. CAPTURAS

Siguiendo el procedimiento explicado en el apartado del funcionamiento de la aplicación, se han obtenido las siguientes imágenes, tanto por el método de fotoluminiscencia como electroluminiscencia:

### 4.1 CAPTURAS FOTOLUMINISCENCIA

Controlando la fuente del diodo laser se han tomado capturas desde 0.5 W hasta 15 W, donde se han seleccionado las que mostraban un mejor aspecto para su visualización y comparación.

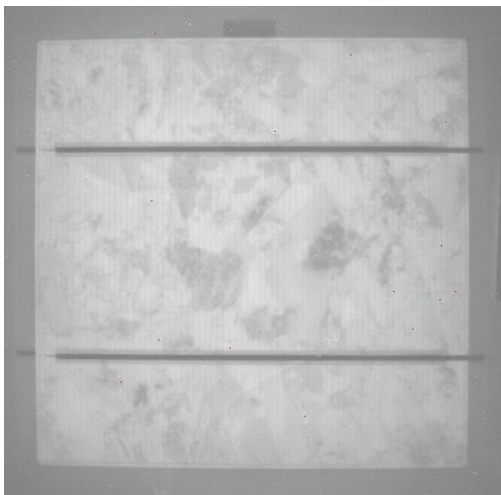


Imagen 39: Prueba fotoluminiscencia de 0.5 W

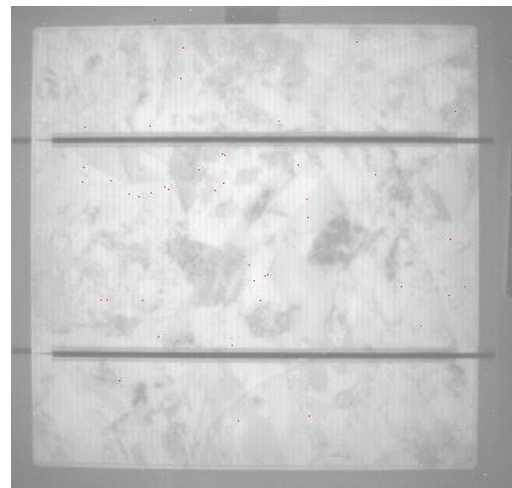


Imagen 40: Prueba fotoluminiscencia de 1.0 W

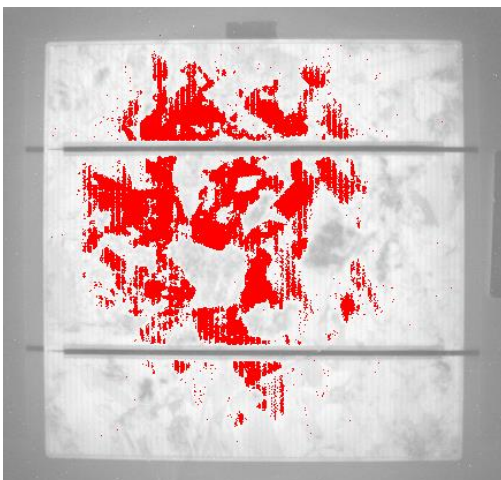


Imagen 41: Prueba fotoluminiscencia de 1.5 W



Imagen 42: Prueba fotoluminiscencia de 2.0 W

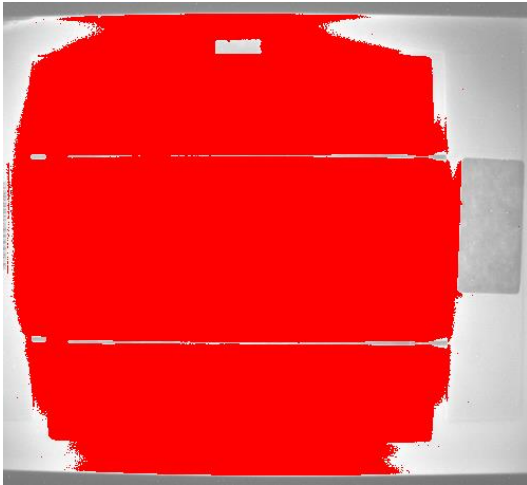


Imagen 44: Prueba fotoluminiscencia de 5.0 W



Imagen 45: Prueba fotoluminiscencia de 8.0 W

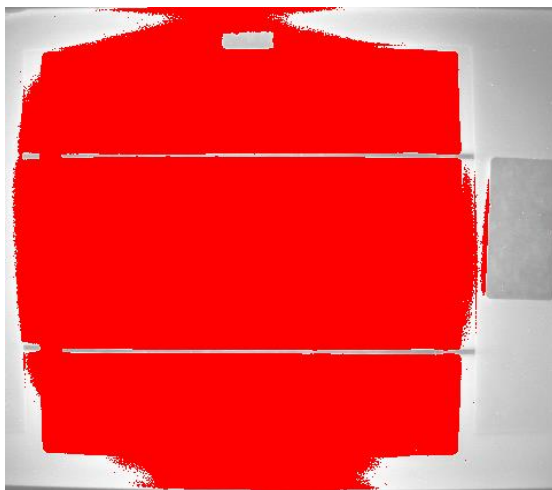


Imagen 46: Prueba fotoluminiscencia de 10.0 W



Imagen 47: Prueba fotoluminiscencia de 15.0 W

## 4.2 CAPTURAS ELECTROLUMINISCENCIA

Controlando la fuente de alimentación se han tomado capturas desde 0.5 A hasta 10 A, donde se han seleccionado las que mostraban un mejor aspecto para su visualización y comparación.

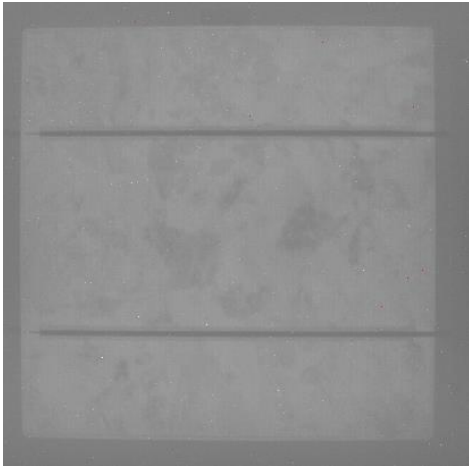


Imagen 48: Prueba electroluminiscencia de 0.5 A

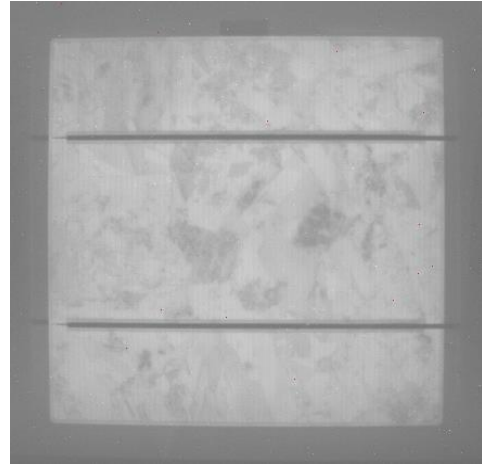


Imagen 49: Prueba electroluminiscencia de 1.0 A



Imagen 50: Prueba electroluminiscencia de 2.5 A

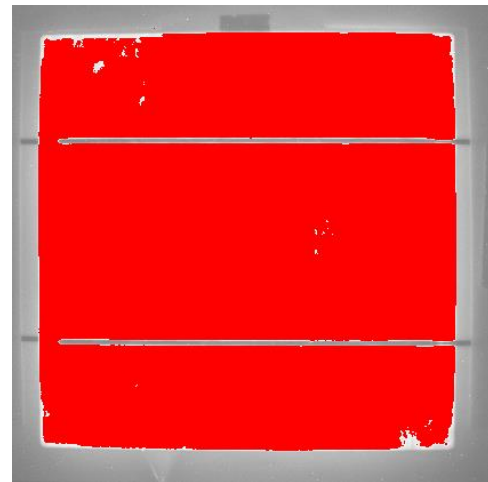


Imagen 51: Prueba electroluminiscencia de 3.5 A

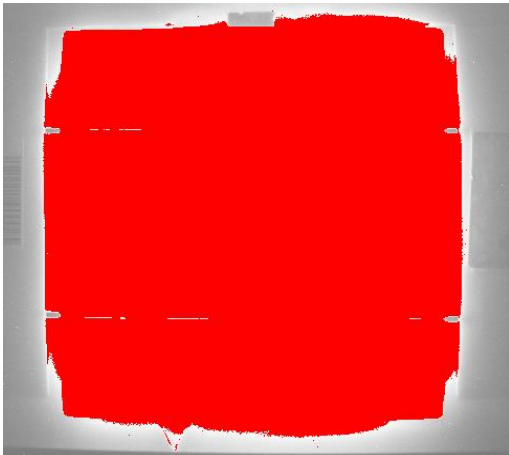


Imagen 52: Prueba electroluminiscencia de 8.0 A

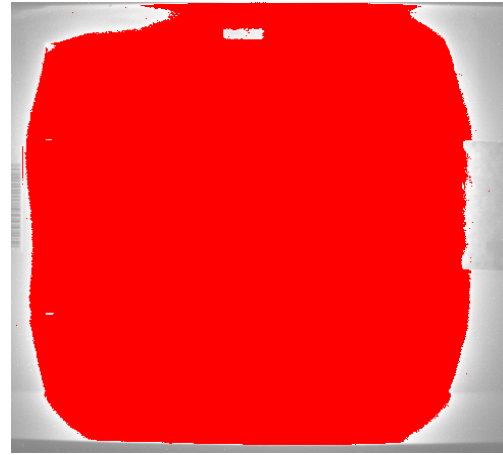


Imagen 53: Prueba electroluminiscencia de 10.0 A

Todas las zonas rojas que aparecen en las capturas se deben a los valores de amperaje y potencia que se han utilizado para el estudio en los diferentes ensayos, como dificultan una correcta visualización de las células solares ara después hacer el tratamiento de las imágenes no nos valen ara el estudio. Se utilizarán las capturas que no muestren estas zonas, es decir, las que se han obtenido suministrando valores más bajos de amperaje y potencia.

## 5. TRATAMIENTO DE IMÁGENES

Una vez obtenidas las imágenes, éstas requieren de un proceso de postprocesado en función de la información que se pretenda obtener de ellas. Para esta labor se ha dispuesto de los softwares *imageJ* y *Fiji* [9].

*ImageJ* es un software de procesamiento de imágenes desarrollado en java y de código abierto. Esto último permite a los usuarios la creación de *pluggins* y macros personalizados que resuelven muchos problemas a la hora del tratamiento y análisis de imágenes. *Fiji* es un software de procesamiento de imágenes de código abierto basado en *ImageJ*.

El propósito principal de *Fiji* es proporcionar una distribución de *imageJ* con muchos *pluggins* incrustados. *Fiji* cuenta con un sistema de actualización integrado y tiene como objetivo proporcionar a los usuarios una estructura coherente de menú, una amplia documentación en forma de descripciones detalladas de algoritmos y tutoriales, y la capacidad de evitar la necesidad de instalar varios componentes de diferentes fuentes.

Estos programas son muy extensos, y poseen *pluggins* para trabajar en diversos campos como la biología o la medicina, entre otros. A continuación, se exponen solamente las herramientas que se han empleado de este software.

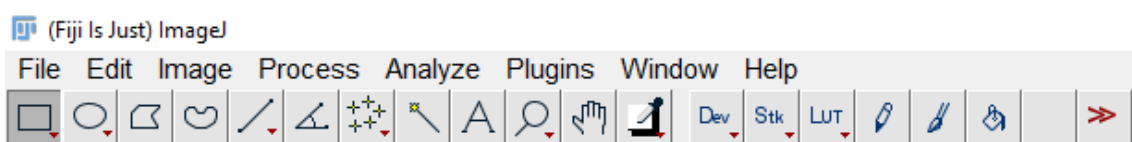


Imagen 54: Ventana principal de control del software para tratamiento de imágenes Fiji

## 5.1 REDUCCIÓN DEL RUIDO Y AJUSTE DEL CONTRASTE

### Ajuste del contraste

Las imágenes adquiridas con las cámaras CCD se guardan en formato .tif, este formato es un formato de imagen sin comprimir por lo que es necesario ajustar el contraste y el brillo de las imágenes para poder ver la franja de luz correspondiente a la célula obviando todo lo demás, como pueden ser: esquinas, bordes, salientes, etc.

Desde el menú *Image* ⇒ *Adjust* ⇒ *Brightness/Contrast* accedemos a una ventana que permite modificar el brillo, el contraste y el nivel de luz máximo y mínimo que se visualizara en la imagen. En este menú se muestra un pequeño histograma que representa el número de píxeles en función de su intensidad de luz.

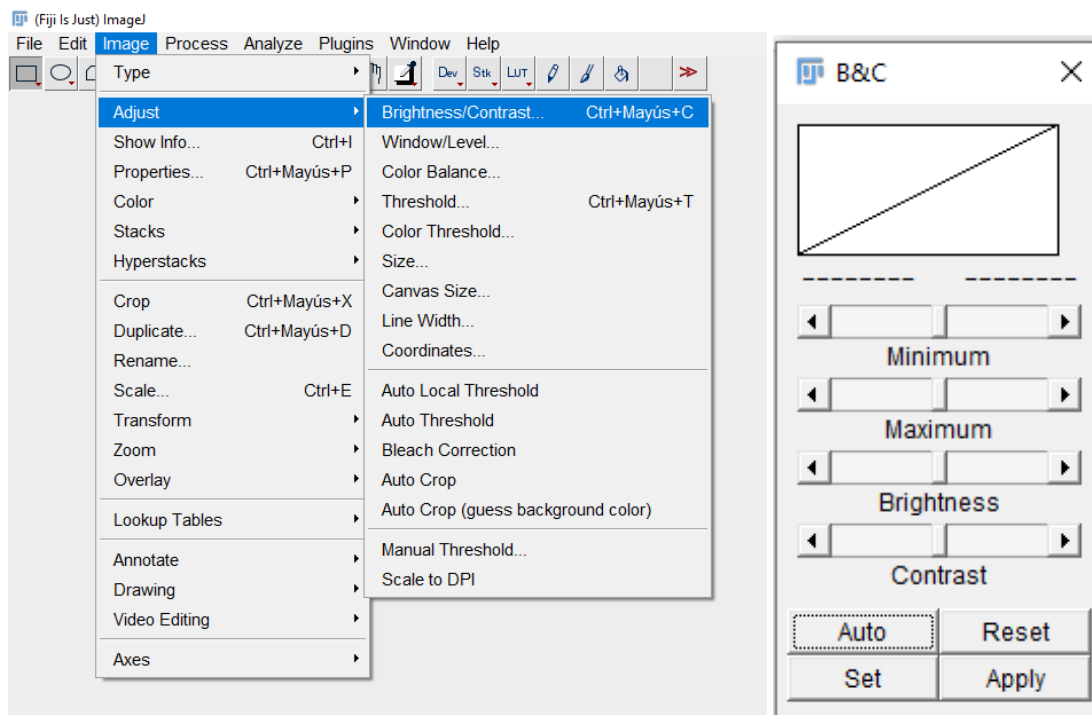


Imagen 55: Ventaja ajuste contraste software Fiji

La opción auto ajusta automáticamente los valores de luz máximo y mínimo para que coincidan con los valores de luz de la imagen. No obstante, es recomendable ajustar estos valores de forma manual para poder obviar todos aquellos píxeles con un bajo nivel de luz que no aporten una información relevante (bordes y partes externas a la muestra), estos píxeles se corresponden con los de la parte izquierda del histograma del menú *Brighthness/- Contrast*, ya que son una gran cantidad de puntos con un bajo nivel de luz.

En la imagen de a continuación, se puede ver una comparación entre una imagen con el contraste y el brillo ajustado en modo automático y otra con el contraste y el brillo ajustado de forma manual, se puede observar como en la imagen ajustada de forma manual el contraste entre zonas claras y zonas oscuras es mucho más elevado y como esto se ve reflejado en el histograma de píxeles del menú *Brighthness/Contrast*



Imagen 56: Contraste ajustado de manera manual e histograma

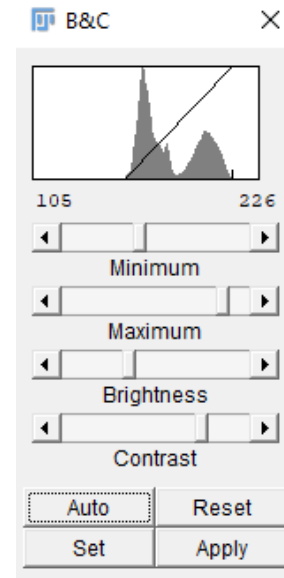
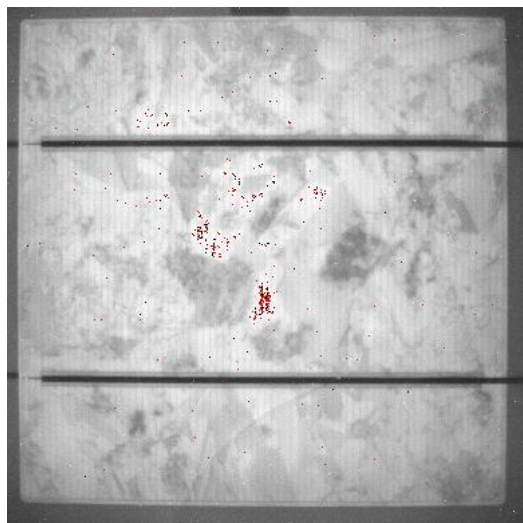


Imagen 57: Contraste ajustado de manera automática e histograma

## Reducción de ruido

El ruido digital es la variación aleatoria del brillo o el color en las imágenes digitales producido por la cámara. En una imagen digital existen muchos tipos de ruido como los antes mencionados, ruido térmico, fotónico y de lectura, pero existe otro tipo de ruido, que se da por el desgaste del sensor CCD es el ruido impulsional. En el tipo de ruido conocido como ruido impulsional, o efecto sal y pimienta, los píxeles de la imagen afectados son muy diferentes en color o intensidad a los píxeles circundantes. Generalmente este tipo de ruido afectará a una pequeña cantidad de píxeles de la imagen. En la imagen se podrán observar puntos blancos sobre puntos negros o puntos negros sobre puntos blancos. Algunos defectos que contribuyen a este tipo de ruido son las manchas de polvo dentro de la óptica de la cámara, o un CCD con píxeles defectuosos que realizará una captura errónea.

Para solucionar este tipo de ruido debe hacerse una corrección de los hot pixels o puntos calientes que es como se denomina a aquellos píxeles a los que les afecta el ruido impulsional.



Usando el software ImageJ esta corrección se hace desde el menú *Process* ⇒ *Noise* ⇒ *Remove outliers*, eligiendo posteriormente el área de píxeles a evaluar alrededor de los *hot pixels* (*Radius*), el nivel de desviación de la media de luz para considerar un píxel como *hot pixel* (*Threshold*) y si los *hot pixels* son puntos demasiado claros o puntos demasiado oscuros (*Which Outliers: Bright/Dark*). En la imagen de a continuación se puede ver el resultado de la corrección de *hot pixels*, así como una imagen del menú *Remove outliers*.

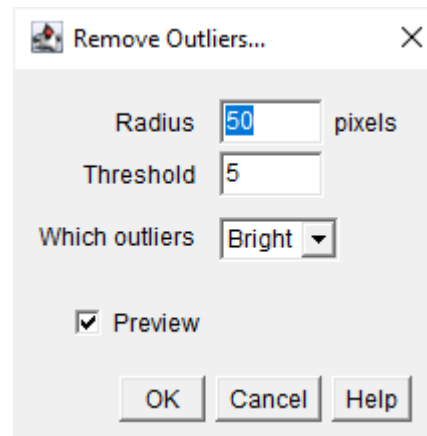
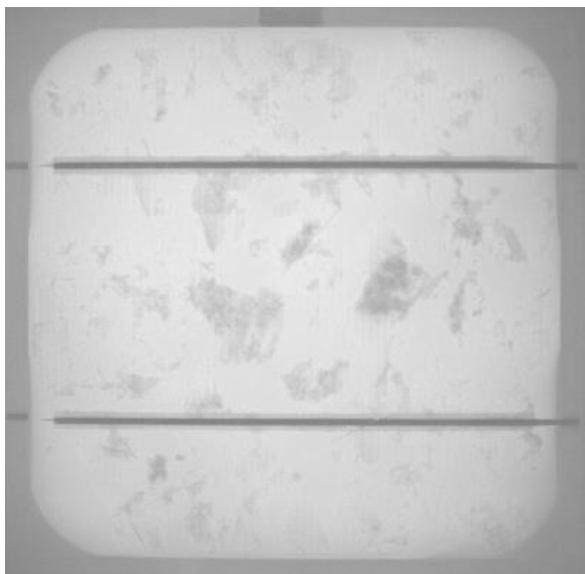


Imagen 58: Ajuste de ruido con una amplia área de píxeles alta y un nivel de desviación bajo

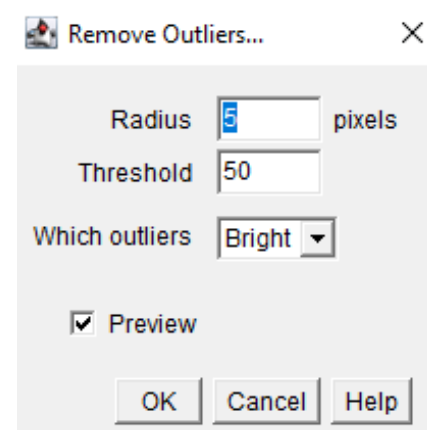
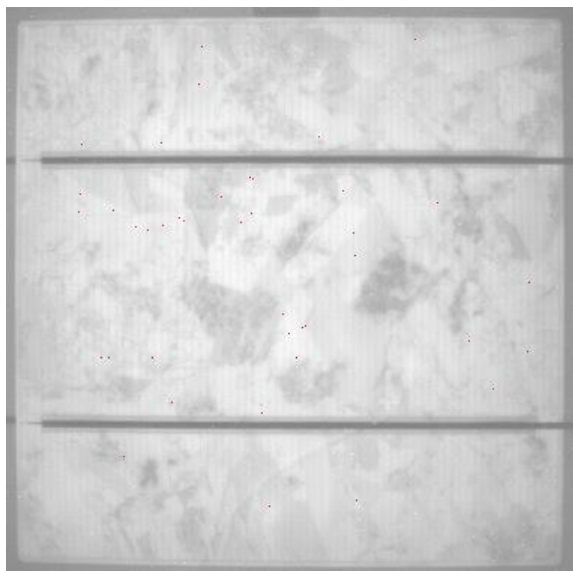


Imagen 59: Ajuste de ruido con una amplia área de píxeles baja y un nivel de desviación alto

## 5.2 APLICACIÓN DE LUTs

Las Look Up Tables o LUTs son, en el tratamiento de imágenes, la aplicación de una gama de colores concreta a los distintos niveles de luz de una imagen, consiguiendo así separar por colores los distintos niveles de iluminación presentes en cada pixel de la imagen.

La aplicación de LUTs a las imágenes de luminiscencia permite hacer un examen visual de las muestras de una forma mucho más objetiva. Esta forma de visualización permitirá detectar más fácilmente zonas con determinados defectos cuya cuantificación ha de hacerse de forma visual, como roturas en la rejilla de contactos o las áreas de tiempo de vida reducido. Existen multitud de LUTs predeterminadas.

Cada una de ellas será óptima para una aplicación concreta, por lo que la forma ideal de trabajar con este tipo de tratamiento de imagen es crear una LUT propia que optimice la visualización de las imágenes de fotoluminiscencia. Para ello el software Fiji posee un editor de LUTs que nos permitirá elegir los colores que más se ajusten a nuestras necesidades.

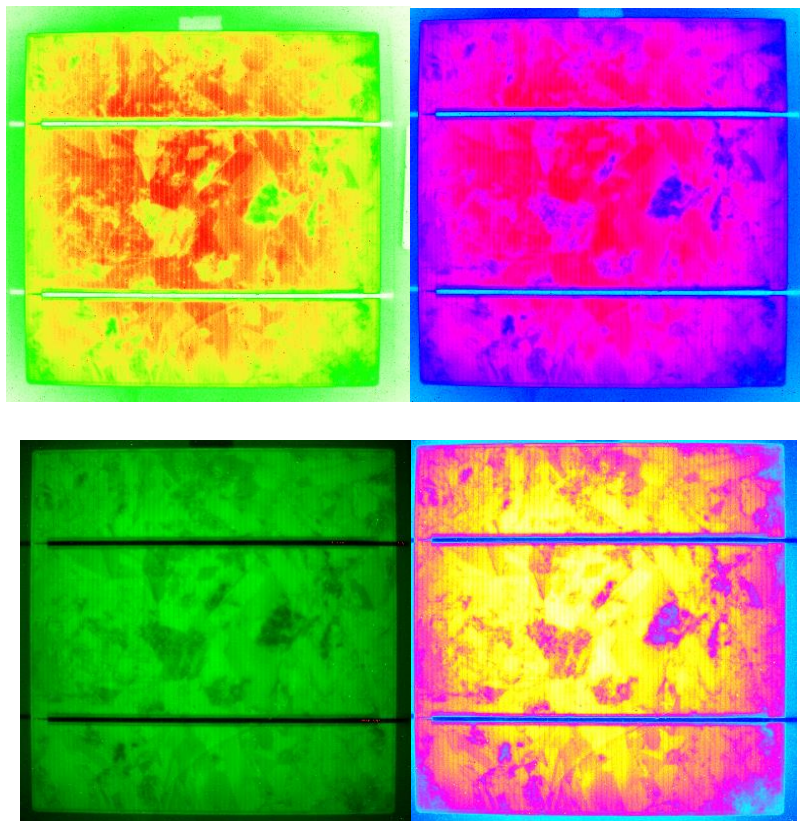


Imagen 60: Diferentes Look Up Tables aplicadas sobre la oblea

## 6. RESULTADOS DE LAS IMÁGENES

De las imágenes anteriores obtenidas mediante los ensayos de fotoluminiscencia y electroluminiscencia usare las imágenes que se pueden observar adecuadamente, es decir, aquellas imágenes que no presenten zonas rojas ya que esto dificultarían su procesamiento y la obtención de imágenes nítidas de las obleas. Dichas zonas fueron ocasionadas por un exceso de voltaje aplicado por la fuente o por la potencia del diodo laser. Se mostrarán cada imagen siguiendo los procedimientos explicados en el apartado anterior de la aplicación *Fiji* y del ensayo correspondiente.

### ENSAYO DE ELECTROLUMINISCENCIA

#### Ajuste del contraste

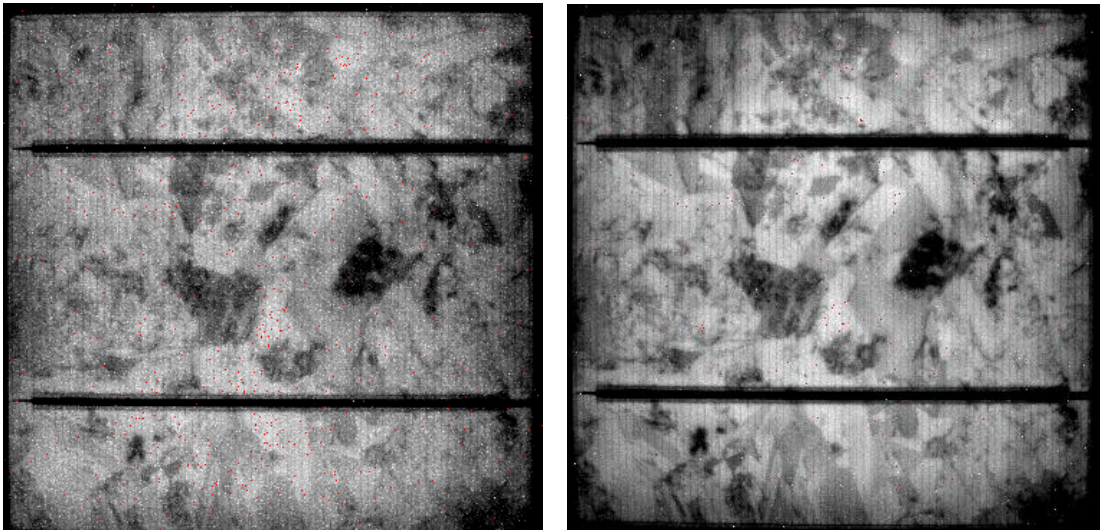


Imagen 61: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 A y 1.0 A respectivamente. Ajuste contraste

## Reducción de ruido

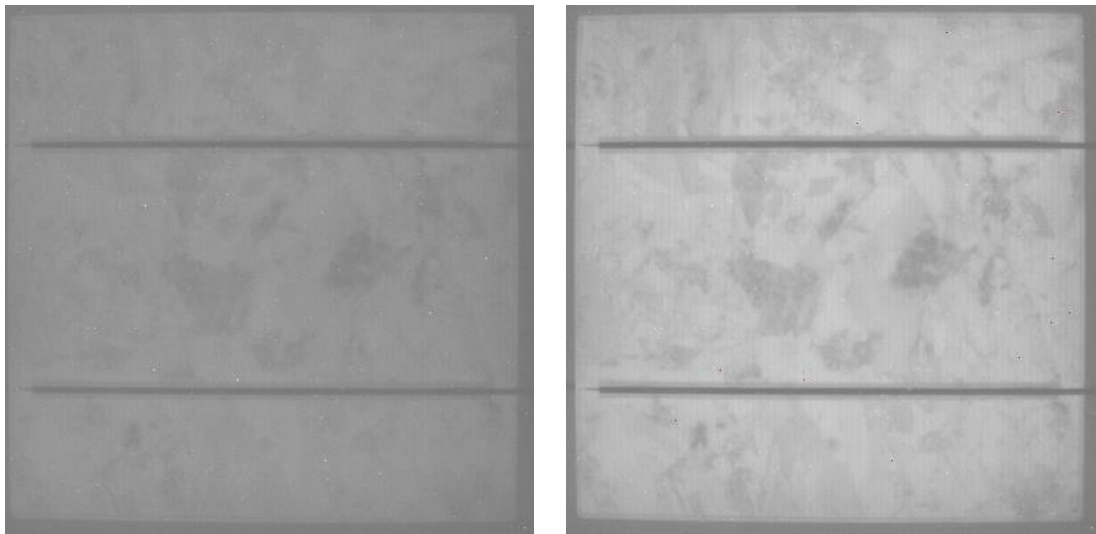


Imagen 62: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 A y 1.0 A respectivamente. Ajuste ruido

## Aplicación LUTs

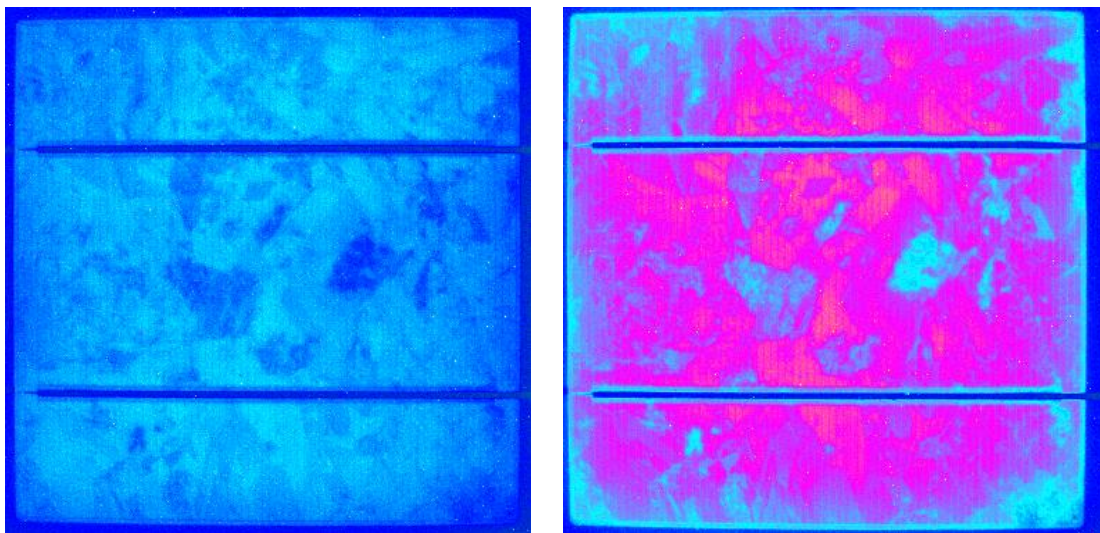


Imagen 63: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 A y 1.0 A respectivamente. Aplicación LUTs

## ENSAYO DE FOTOLUMINISCENCIA

### Ajuste del contraste

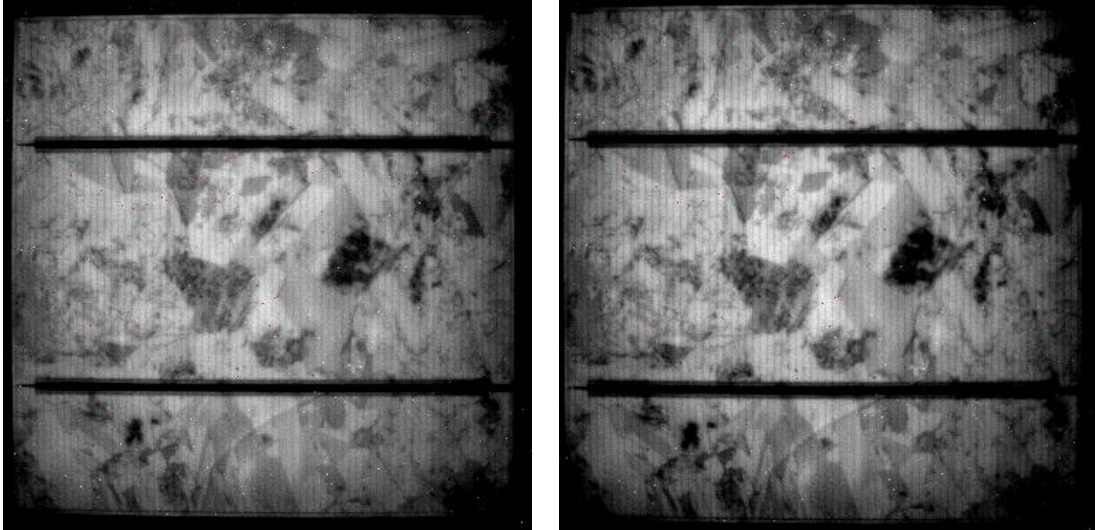


Imagen 64: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 W y 1.0 W respectivamente. Ajuste contraste

### Reducción de ruido

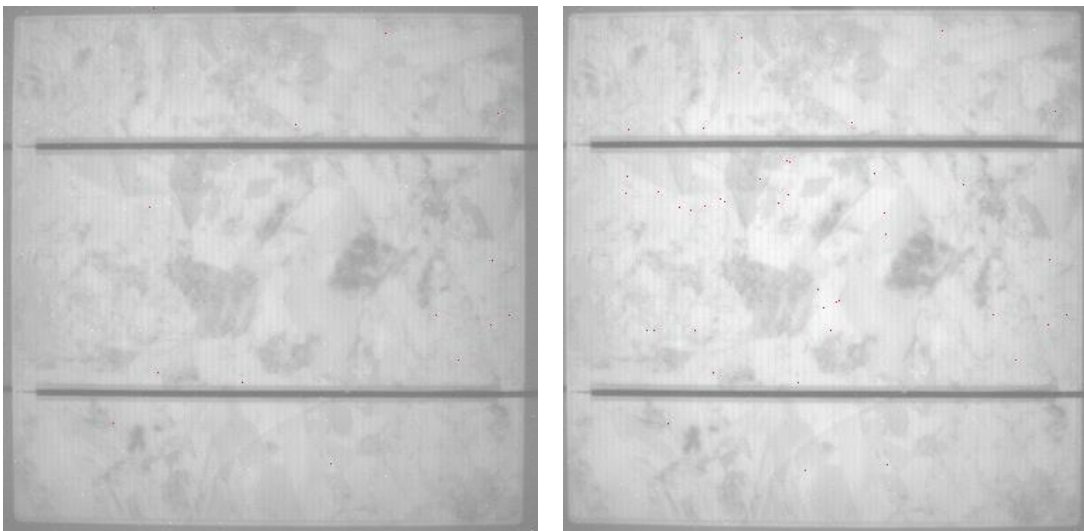


Imagen 65: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 W y 1.0 W respectivamente. Reducción ruido

## Aplicación LUTs

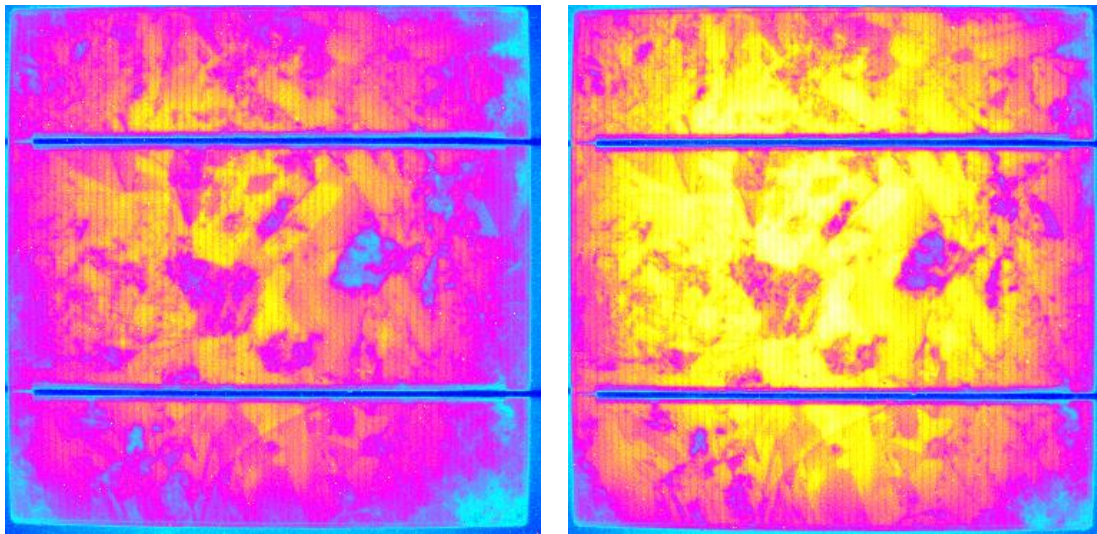


Imagen 66: Pruebas de fotoluminiscencia de 0.5 W y 1.0 W respectivamente. Aplicación LUTs

## 7. ANALISIS CUALITATIVO DE LAS IMAGENES EN LAS CELULAS SOLARES

Como se expuso al principio de este trabajo, el objetivo final era conseguir en la medida de lo posible la reducción de la acción humana para la toma de datos y resultados para los ensayos de fotoluminiscencia y de electroluminiscencia en células solares, a su vez, permite determinar ciertas características de estas, así como detectar posibles defectos en dichas células. Para exponer dichos defectos se usarán las imágenes obtenidas en los ensayos de fotoluminiscencia ya que son las que presentan mejor una imagen detallada de la exposición lumínica en la célula solar que la que puede ver mediante el ensayo de electroluminiscencia inyectando corriente.

Los defectos que se pueden detectar son los siguientes [10]:

- **Microgrietas:** Las grietas en las células solares son un verdadero problema para los módulos fotovoltaicos ya que son difíciles de evitar y, hasta el momento, es básicamente imposible cuantificar su impacto en la eficiencia del módulo durante su vida útil. En concreto, la presencia de microgrietas puede tener un efecto marginal sobre la potencia de un módulo, siempre y

cuando las diferentes partes de las células están todavía conectadas eléctricamente. Sin embargo, en los módulos de cierta edad, debido a tensiones térmicas y mecánicas pueden aparecer microgrietas. La aparición de varias microgrietas en la misma zona puede llevar a una rotura total de la célula, lo que generara que partes de la célula se queden inactivas.

- **Calidad del material:** reducción de la tensión de circuito abierto: La tensión de circuito abierto es la tensión a la que la corriente de difusión en directa es exactamente igual a la corriente de cortocircuito. Esta corriente de difusión en directa crece en función de la cantidad de electrones que se recombinan en la unión p-n, y a medida que crece hace disminuir la tensión en circuito abierto. El parámetro del material que da la recombinación en polarización directa es la corriente de saturación del diodo. La recombinación, a su vez es controlada por el número de portadores en el borde de la unión, la presencia de fuentes de recombinación localizadas dentro de la longitud de difusión de la unión y la longitud de difusión en el material. Una longitud de difusión baja significa que los portadores minoritarios desaparecen desde el borde de la unión con rapidez debido a la recombinación lo que permite que haya más caminos de cruce para los portadores minoritarios y por lo tanto una mayor corriente de difusión y una menor tensión de circuito abierto. La longitud de difusión depende del tipo de material, del proceso de transformación de la oblea de silicio y del dopado. Un alto dopado reduce la longitud de difusión por lo que se antoja necesario buscar un equilibrio entre el mantenimiento de una alta longitud de difusión y la obtención de una alta tensión de circuito abierto
- **Baja resistencia en paralelo:** Defectos intrínsecos de la célula o inducidos mecánicamente por agentes externos, pueden generar derivaciones en el circuito de la célula lo que provoca la reducción de la resistencia en paralelo global de la célula que conlleva una tensión de circuito abierto reducida
- **Degradación inducida por potencial:** La degradación inducida por potencial (PID por la expresión inglesa *potential induced degradation*) es una degradación en paneles fotovoltaicos causante de pérdida de rendimiento que se debe a la presencia de corrientes parásitas en los mismos. Su efecto potencial puede reducir la potencia del equipo hasta en un 30 %. La causa de estas corrientes se debe a la presencia de diferencias

de potencial entre el módulo y tierra. En la mayoría de los sistemas fotovoltaicos sin puesta a tierra, los módulos tienen un voltaje no nulo que genera este efecto, si bien es más frecuente en voltajes negativos, especialmente cuando se dan condiciones de altos voltajes, alta humedad ambiental o elevadas temperaturas. El efecto puede ser completamente prevenido si el inversor presenta la opción de poner a tierra el polo positivo o negativo. La elección de cual aterrizar debe ser tomada de acuerdo con la tecnología de los módulos y del tipo de inversor.

En la siguiente imagen se puede ver una corrección apta para detectar defectos mediante un estudio cualitativo a la que se le ha aplicado una LUT que va del amarillo al negro en función de la luminiscencia. La LUT aplicada variara en función de lo que se pretenda apreciar en la imagen, en este caso se ha elegido una LUT amarilla para zonas de alta luminiscencia y negra para zonas de baja luminiscencia que quedaran muy contrastadas aun siendo estas muy pequeñas o finas, como se puede apreciar en la imagen. También se han localizado algunos de los defectos expuestos anteriormente como microgrietas o la degradación inducida por potencial. En la muestra se pueden apreciar más defectos de los que se han señalado ya que solo se pretende exponer un ejemplo de los tipos de defectos visibles en la imagen de fotoluminiscencia.

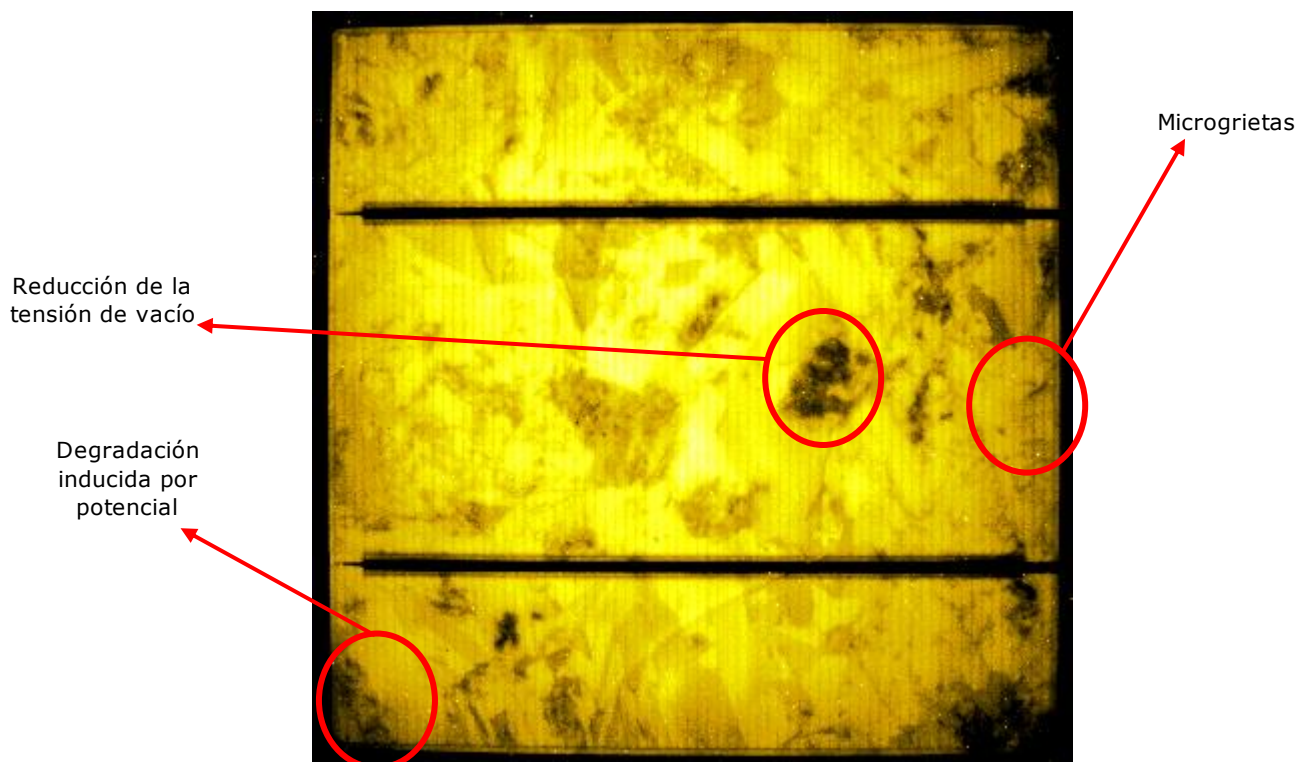


Imagen 67: Muestra ensayo fotoluminiscencia una vez aplicadas todas las correcciones



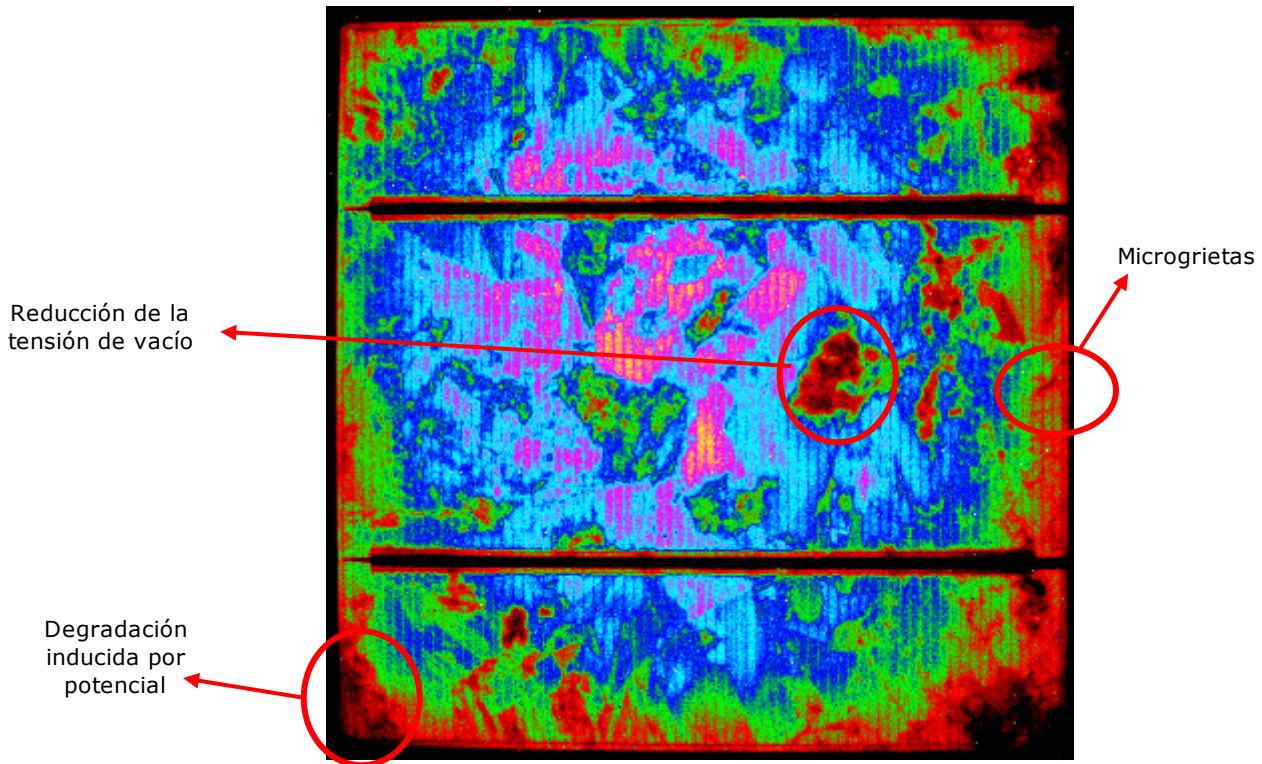


Imagen 68: Muestra con el ajuste 6 shades de LUTs en Fiji

En el estudio cualitativo de las imágenes de luminiscencia se puede apreciar como el rendimiento de las células solares está relacionado con la presencia de zonas oscuras en estas imágenes. Para ver esto, en las imágenes 69 y 70 se expone el resultado del ensayo de fotoluminiscencia de una célula y en la que se puede apreciar como la zona donde se produce la fotoluminiscencia está marcada con un color amarillo intenso las zonas donde no se produce son de un color azul oscuro.

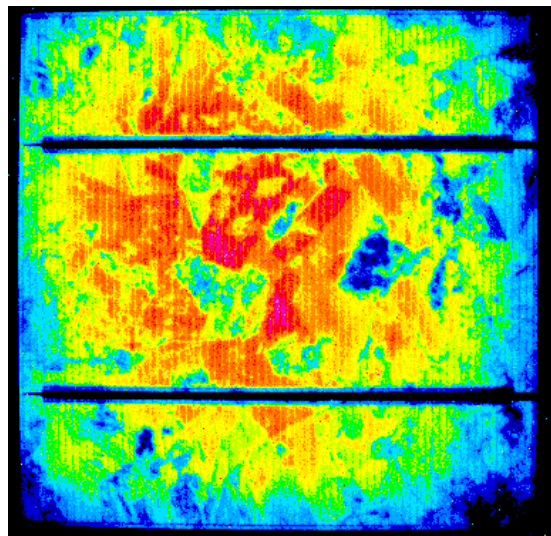
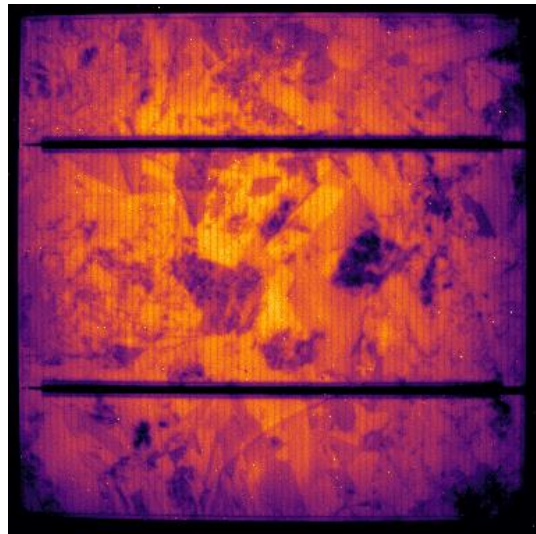


Imagen 69: Muestra con el ajuste 16 colors de LUTs en Fiji



*Imagen 70: Muestra con el ajuste blue-orange-igb de LUTs en Fiji*

Con estas muestras se ve claramente que, si en una célula solar existen múltiples defectos y zonas oscuras, se verá afectado el rendimiento energético que esta puede aportar, así como el nivel de fotoluminiscencia emitido por esta.

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

**Conclusiones:** En este TFG se ha concluido la automatización de un programa que permita obtener muestras de ensayos tanto de fotoluminiscencia como de electroluminiscencia y obtener con ello una serie de oportunidades para el estudio de las características, posibilidades y resultados de la caracterización de células solares y obleas de silicio, sin que una persona tenga que estar manipulando de continuo los aparatos usados para estos ensayos (fuente de alimentación y diodo laser).

**Trabajo futuro:** Como toda aplicación realizada por *python*, esta se puede mejorar para simplificar tanto la interfaz de la aplicación que usa el usuario, así como el envío de valores de voltaje y potencia que se quieran usar para los ensayos, integrar la captura de imágenes y los ajustes de imágenes que aporta *Fiji*.

## BIBLIOGRAFÍA

- ❖ [1] José Balenzategui. Fundamentos de la conversión fotovoltaica: La célula solar. 2007.
- ❖ [2] Jose Roldan Vilorio, INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS
- ❖ [3] Chao Shen, Henner Kampwerth, and Martin A Green. Photoluminescence based open circuit voltage and effective lifetime images re-interpretation for solar cells: The influence of horizontal balancing currents. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130:393–396, 2014.
- ❖ [4] Marcelo Romero Tous, ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA
- ❖ [5] J. L. Balenzategui Manzanares, FUNDAMENTOS DE LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA: LA CÉLULA SOLAR. 2008.
- ❖ [6] Mario Baselga Carreras, CLASIFICACION DE LAS INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS Y SUS COMPONENTES (ISF)
- ❖ [7] Santiago Aguirre, INTRODUCCION A PYTHON.
- ❖ [8] Vincent Boucheny, PROGRAMACION ORIENTADA A OBJETOS.
- ❖ [9] Jose Maria Mateos Perez, Javier Pascau, *Image Processing with ImageJ*.
- ❖ [10] S. Deitsch et al., "Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images".

## 9. ANEXOS



### THURLBY THANDAR INSTRUMENTS CPX400D | CPX400DP



Dual output PowerFlex dc power supply - 840 watts total power  
 high performance autoranging outputs, 60V and 20A maximum  
 true analog controls with digital functionality including S-Lock  
 isolated tracking for easy series/parallel use - up to 120V or 40A  
 GPIB, RS-232, USB and LAN interfaces; LXI class C compliance

[tti-test.com](http://tti-test.com)

[aimtti.com](http://aimtti.com) | [tti.eu](http://tti.eu) | [ttid.co](http://ttid.co) | [aimtti.us](http://aimtti.us)



## CPX400D - Dual 420 watt PowerFlex dc power supply (840W total)

View and adjust setting limits at any time.

High accuracy four digit meters have a fixed resolution for consistent readings at-a-glance.

Range Control gives a choice of PowerFlex (60V/20A) or fixed range operation (60V/7A or 20V/20A).

True analog controls make adjustment quick and simple.

Voltage sensing can be changed between local and remote at the flick of a switch.

Safety binding post terminals can accept fixed-shroud 4mm plugs\*\* as well as normal plugs, bare wires, and fork connectors.

### Choose voltage and current combinations to suit your applications !

The CPX series is a different type of laboratory power supply designed to meet the need for flexibility in the choice of voltage and current.

A conventional PSU has a fixed current limit giving a power capability that reduces directly with the output voltage.

The TTI PowerFlex design of the CPX series enables higher currents to be generated at lower voltages within an overall power limit envelope.

Each output can provide considerably higher current than a conventional PSU of the same maximum voltage and power (see power curve).

Example voltage & current combinations include 60V/7A, 42W/10A, 28V/15A, and 20V/20A.

### Building upon success

The CPX400D & DP are the latest models in the CPX series and were developed from the CPX400A, one of the most successful power supplies ever.

### Analog controls with digital stability

As technology has changed, many products have moved from analog controls to digital ones. Although digital controls suit many instruments, they do not necessarily suit a bench power supply.

Customer research shows that many users prefer the speed and simplicity of conventional analog controls for setting voltage and current. Digital controls may offer greater precision, but often at the expense of ease-of-use. With this in mind, the CPX400D retains the true analog controls of its predecessor.

**Lock your settings at the touch of a button !**



The main disadvantage of analog controls is stability and security. The settings of analog potentiometers can drift over time. More importantly, the settings can be changed accidentally with potentially serious consequences.

The CPX400D incorporates S-Lock. One press of the Lock button transfers control of voltage and current from the analog controls to internal digital circuitry. This offers not just complete security, but exceptional stability as well with each setting controlled by an instrumentation quality DAC.

S-Lock digitally locks voltage and current settings at the touch of a button.

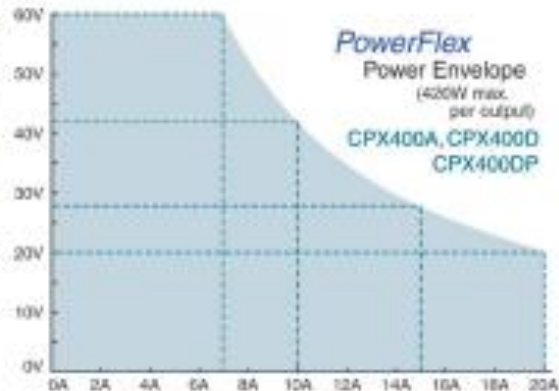
DC output switches enable voltage and current to be set up before connecting the load.

Individual over-voltage protection for each output.

Custom Limits enables the analogue controls to cover any voltage or current range.

Both On/Off provides synchronous switching of the outputs.

Isolated voltage tracking facilitates tracking voltage rails or control for series or parallel wiring (120V max. or 40A max.).



### Isolated voltage tracking for maximum flexibility

The two outputs of the CPX400D are completely independent and electrically isolated from each other.

With V-Track selected, the two outputs remain electrically isolated, but the voltage control of the Master output sets an identical voltage on the Slave output.

This enables the user to create two rails of either polarity and to reference them to different grounds if necessary (e.g. digital ground and analog ground). Alternatively the outputs can be wired in series or parallel to create a voltage capability up to 120V or a current capability up to 40A with the voltage set using a single control.



### Independent and simultaneous output control

The Both On/Both Off button is in addition to the individual switches for each output, and allow both outputs to be turned on or off synchronously by a single button press.

Synchronous switching of the outputs is of increasing importance for circuitry which can be damaged if one voltage rail is present without the other.

## CPX400DP - GPIB, RS-232, USB and LAN interfaces; LXI class C compliance

- ▶ PowerFlex design gives variable voltage and current combinations within a maximum power envelope
- ▶ Up to 60V and up to 20A per output (420W maximum)
- ▶ Constant voltage or constant current operation
- ▶ Low output noise and good transient response
- ▶ PowerFlex or fixed-range operation plus custom limits
- ▶ True analogue controls with digital settings locking
- ▶ Independent outputs or isolated voltage tracking
- ▶ Outputs can be wired in series or parallel for 120V or 40A
- ▶ Variable OVP trips; safety binding-post terminals
- ▶ 4 digit fixed resolution meters; selectable remote sensing
- ▶ GPIB, RS-232, USB and LAN interfaces with LXI class C compliance (CPX400DP only)
- ▶ Compact 1/2 rack case; additional rear terminals on CPX400DP

### Low noise and good dynamic response

The PowerFlex regulation system used on the CPX400D & DP combines a high frequency pre regulator with a linear post regulator to give both low noise and good transient response. Each output can operate in constant voltage or constant current mode with automatic crossover and mode indication.

### Precision metering and remote sense

Separate voltage and current meters on each output give a resolution of 10mV and 10mA. The fixed resolution avoids the misinterpretation of readings that can occur with auto-ranging 3 or 3 1/2 digit meters where the decimal point position moves as the reading changes.

Coarse and fine voltage controls are provided. The current control is logarithmic enabling low current levels to be set accurately. A View Settings button enables limit settings to be checked and adjusted at any time.

Each output incorporates remote sense terminals that can be enabled or disabled at the flick of a switch. Remote sensing is essential for maintaining precise regulation at the load and true metering of the load voltage.

### Compact design uses minimum bench or rack space

Despite the high power output of 840 watts, the CPX400D & DP has a small bench footprint taking up less space on a crowded bench.

For rack-mount applications the half-rack by 3U case size enables two units (providing four outputs) to be fitted into a single rack slot.

### Range control offers even more flexibility

As an alternative to PowerFlex operation (60V/20A subject to a power limit), the CPX400D & DP can be used as conventional fixed range power supplies of either 60V/7A or 20V/20A at the press of a button.



Fixed range mode ensures that, whatever the load, the output can only be in constant voltage or constant current mode and never in power limit. Additionally finer resolution is provided on the current or voltage controls respectively.

A further button offers full customisation of voltage and current limits which can be set to suit the users application. This has the advantage that the controls cover the exact voltage and current range required, providing easier setting and reduced risk of error.

For example, the range could be set to 30V and 14A to create a 30 volt PSU of maximum current capability. Alternatively it could be set to 5V and 3A if this was all that was required for a particular application.

### Safety binding-post terminals

CPX series power supplies are fitted with the new TTI designed output terminals. These can accept a 4mm safety plug with rigid insulating sleeve, a requirement specified by an increasing number of laboratories for safety reasons.



### Bench and System use - CPX400DP

The CPX400DP is a bus programmable version of the CPX400D which includes all of the manual control features; plus comprehensive digital interfaces and rear terminals.

#### Rear output terminals

Power and sense terminals are duplicated on the rear panel for rack mount applications or other situations where rear connection is more appropriate.

#### Digital remote control

To meet the varying needs of today's engineers, a comprehensive array of interfaces is provided. RS-232, USB, GPIB and LAN (Ethernet) with LXI support are provided as standard. Each of the digital bus interfaces provides full control of voltage, current, and output on/off, plus read-back of voltage, current and status. The interfaces are at ground potential and are opto-isolated from the output terminals.

#### GPIB

The GPIB interface is compliant with IEEE-488.1 and IEEE-488.2. Currently GPIB remains the most widely used interface for system applications.

#### RS-232

An RS-232/RS-423 interface is provided for use with legacy systems. This type of serial interface remains in common usage and is perfectly satisfactory for the control of power supplies because data speed is not an issue.

#### USB

USB provides a simple and convenient means of connection to a PC and is particularly appropriate for small system use. A USB driver is provided which supports Windows 2000, XP, Vista and Windows 7.

#### LAN (Ethernet)

The LAN interface uses a standard 10/100 base-T Ethernet hardware connection with ICMP and TCP/IP Protocol for connection to a Local Area Network or direct connection to a single PC. This interface supports LXI and is highly appropriate for system use because of its scalable nature and low cost interconnection.

#### LXI Compliance

The LAN interface is compliant with LXI-C. LXI (LAN Extensions for Instrumentation) is the next-generation, LAN-based modular architecture standard for automated test systems managed by the LXI Consortium, and is expected to become the successor to GPIB in many systems. For more information on LXI and how it replaces GPIB, or operates along side it, go to: [www.ti-test.com/go/lxi](http://www.ti-test.com/go/lxi)

#### IVI Driver

An IVI driver for Windows is included. This provides support for common high-level applications such as LabView®, LabWindows®, and HRAgilent VEE®.



## Specifications CPX400D & CPX400DP

### OUTPUT SPECIFICATIONS (each output)

#### Voltage/Current/Power Levels

Voltage Range: 0V to 60V.

Current Range: 0A to 20A.

Note: Actual maxima for voltage and current are typically 1% greater than the figures given above.

Power Range: Up to 420W subject to power envelope.

#### POWER ENVELOPE

The maximum current at any voltage settings is limited by the power envelope which is set to give 7A at 60V rising to 20A at 20V under all ac supply conditions (both outputs loaded). At lower output voltages the power is restricted by the 20 amps current maximum.

See PowerFlex power envelope graph on previous page.

#### Output Setting & Control

Voltage Setting: By coarse and fine controls.

Current Setting: By single logarithmic control.

Output Mode: Constant voltage or constant current with automatic cross-over.

CC indicator lit in constant current mode.

Output Switch: Electronic, non isolating. Preset voltage and current limit displayed when Output is off. Output rise time no load <10ms.

View Settings: With the output On, the meters show actual voltage and current.

The preset levels can be viewed and adjusted at any time by pressing the View Settings button.

Status Indication: LED indication of Output On, V/I Limits, CV, CI, Power Limit, Remote, LAN status. Message on meter display for trip condition.

LED indication of Output On, V/I Limits, CV, CI, Power Limit, Remote, LAN status. Message on meter display for trip condition.

#### S-Lock

(Settings Lock) Voltage and current settings can be locked by a single button press.

Lock accuracy is equal to the meter accuracy (see Meter Specifications).

#### Output Performance

Ripple & Noise: Typically <3mV rms, <15mV pk-pk, (5mV rms max.) in CV mode.

Load Regulation: Voltage - <0.01% of maximum output for any load change within the PowerFlex envelope (remote sense connected).

Current - <0.05% of maximum output for any load change within the PowerFlex envelope.

Line Regulation: Voltage - <0.01% of maximum output for a 10% line change.

Current - <0.01% of maximum output for a 10% line change.

Transient Response: <250µs to within 50mV of setting for a 5% to 95% load change.

Temp. Coefficient: Typically <100ppm/°C

#### Output Protection

Output Protection: Forward protection by Over-voltage Protection (OVP) trip.

Reverse protection by diode clamp for currents to 3A.

OVP Setting/Range: Via screwdriver adjustable preset on front panel. Range 1V to 66V

Over-temperature: Output trips off for over-temperature.

Safety Interlocks: Operations that could cause an unexpected change in voltage or current settings are interlocked with the output switch.

Operations that could cause an unexpected change in voltage or current settings are interlocked with the output switch.

#### Output Connections

Output Terminals: Universal 4mm safety binding posts on 19mm (0.75") spacing at front.

Screw terminals at rear (CPX400DP only).

Terminals can accept fixed shroud 4mm plugs, standard 4mm plugs, fork terminals and bare wires.

#### Remote Sense

Sense Selection: Voltage sensing is selected as Local or Remote by front panel switch.

Sense Terminals: Spring loaded screw-less terminals at front.

Screw terminals at rear (CPX400DP only).

### METER SPECIFICATIONS (each output)

Display Type: Dual 4-digit meters, 10mm (0.39") LED.

#### Voltage Meter

Resolution/Accuracy: 10mV / ± 0.1% of reading ± 2 digits

#### Current Meter

Resolution/Accuracy: 10mA / ± 0.3% of reading ± 20mA

### VOLTAGE TRACKING

#### Independent Mode

In the normal mode of operation, each output is fully independent and isolated. Operation is equivalent to two single output power supplies.

#### Voltage Tracking Mode

The two outputs remain isolated, but the Slave voltage controls are disabled and the Slave voltage is set equal to the Master voltage. This can be used to generate tracking bipolar voltages, or tracking unipolar voltages relative to different grounds.

When voltages greater than 60V are required, the outputs can be wired in series to generate 0 to 120V with the voltage controlled from the Master.

When currents greater than 20A are required, the outputs can be wired in parallel to create the equivalent of a 40A power supply with the voltage controlled from the Master.

Track Accuracy: Slave voltage = ± (0.1% of Master voltage setting + 10mV)

### BOTH ON / BOTH OFF

Each output has an independent DC On/Off control, however, an additional control button is provided which turn both outputs on or off simultaneously.

### DIGITAL BUS INTERFACES (CPX400DP only)

The CPX400DP offers full remote control and read-back using RS-232, USB, GPIB or LAN (compliant with LXI class C). All interfaces are at ground potential and opto-isolated from the output terminals. Note: Remote/Local Sense is manually selectable only.

#### RS-232

Standard 9-pin D connector. Baud rate 9,600.

#### USB

USB 2.0 connection (backwards compatible with USB 1.x). Operates as a virtual COM port.

#### GPIB (IEEE-488)

The interface conforms with IEEE-488.1 and IEEE-488.2.

#### Ethernet (LAN)

Standard 10/100 base-T hardware connection. ICMP and TCP/IP Protocol for connection to Local Area Network or direct connection to a single PC.

#### LXI Compliance

LAN interface is compliant with LXI class C. (LXI is the abbreviation for Lan eXtensions for Instrumentation). For more information visit: [www.tti-test.com/go/lxi](http://www.tti-test.com/go/lxi)

### DIGITAL PROGRAMMING PERFORMANCE (CPX400DP only)

#### Voltage Setting

Resolution/Accuracy: 1mV / ± (0.05% + 10mV)

#### Current Setting

Resolution/Accuracy: 1mA / ± (0.3% + 5mA)

#### Programming Speed

Command Delay: Typically <25ms (this must be added to any of the figures below)

Voltage Up Time: <10ms\* to 1%

Voltage Down Time: <80ms\* to 1% (full load); <1.5s\* to 1% (no load)

\* The up and down times vary with range and voltage step size. More information is contained in the operating manual which can be downloaded from our web site.

### DRIVER SOFTWARE SUPPLIED (CPX400DP only)

#### IVI Driver

An IVI driver for Windows is supplied. This provides support for common applications such as LabView\*, LabWindows\*, HPVEE\* etc.

#### USB Driver

An installation file is supplied which calls a standard Windows\* USB driver.

\* LabView and LabWindows are trademarks of National Instruments.

HPVEE (now Agilent VEE) is a trademark of Agilent Technologies.

\* USB interface is supported for Windows 2000, XP, and Vista.

Windows is a trademark of Microsoft.

### GENERAL SPECIFICATIONS

#### Input

AC Input: 110 to 240 volts ±10% 50/60Hz. Installation Category II.

Input Power: 1250VA max.

#### Temperature & Environmental

Operating Range: +5°C to +40°C, 20% to 80% RH

Storage Range: -40°C to +70°C

Environmental: Indoor use at altitudes up to 2000m, Pollution Degree 2.

Cooling: Rear discharge variable speed fan.

#### Safety & EMC

Safety: Complies with EN61010-1

EMC: Complies with EN61326

#### Physical

Size: 210 x 130 mm (1/2 rack 3U) x 375mm

(size excludes feet, knobs and terminals).

Weight: 6.3kg

### OPTIONS

#### Rack Mount (RM300A)

19 inch 3U rack mount suitable for one or two power supplies.

Accuracy specifications apply for the temperature range 18°C to 28°C after one hour warm-up. Turley Thandar Instruments Ltd. operate a policy of continuous development and reserves the right to alter specifications without prior notice.



[www.bwt-bj.com](http://www.bwt-bj.com)**Direct Diode Laser System**

DS3-11312-101-K635F09FN-0.40W DS3-11312-xxx-LD No.

**Features:**

- Up to 300W output power
- Air cooling
- Fiber delivery
- Red aiming beam (optional)
- Temperature control
- Compact design

BWT Beijing provides a complete, turn-key diode laser system suitable for material processing, medical therapeutics and pumping solid-state laser media. Delivering up to 50W of diode laser into a 100~400um core fiber, the system makes it easy to develop new applications.

With control over the operating temperature of the diode laser, as well as current and pulse width, the system offers flexibility and an easy to use interface. The system can be controlled either by the front panel user interface, or by a computer-controlled RS-232 interface.



## Direct Diode Laser System

DS3-11312-101-K635F09FN-0.40W DS3-11312-xxx-LD No.

Specifications		DS3-11312-101-K635F09FN-0.40W	DS3-11312-xxx-LD No.	
<b>Optical Data</b>	CW-Output Power	400mW	2W,4W, 8W,10W,15W	20W, 30W, 50W
	Center Wavelength	635nm	808nm, 915nm, 980nm	
	Tolerance of $\lambda$	$\pm 10$ nm		
	Spectral Width (FWHM)	<3nm		
	Power Stability	$\pm 5\%$		
<b>Fiber Data</b>	Fiber Core Diameter	105, 200 $\mu$ m	105,200,300,400 $\mu$ m	105,200,300,400 $\mu$ m
	Numerical Aperture	0.22		
	Fiber Connector	SMA-905		
<b>LD Controller Data</b>	Control Range	15~30 $^{\circ}$ C		
	Accuracy	$\pm 1^{\circ}$ C		
	Alarm Setting	15~30 $^{\circ}$ C		
	Operation Mode	CW/QCW		
	Operation Current	<1A	<10A	<15A
<b>Operation Requirements</b>	Operation Temperature	0~40 $^{\circ}$ C		
	Cooling Requirement	Internal fan. At least 10 cm clearance, both sides		
	Operation Humidity	5-80%		
	Storage Temperature	-20-55 $^{\circ}$ C		
<b>Power Supply Requirements</b>	Input Power	220 V AC, 50 ~ 60 Hz or AC 90~260 V, 50 ~ 60 Hz		
	Power Loss	<30W	<100W	<500W
<b>Others</b>	Dimensions (L×W×H)	296×254×115mm	296×254×115mm	420×337×174mm
	Weight	<10Kg	<10Kg	<18Kg



**Direct Diode Laser System**

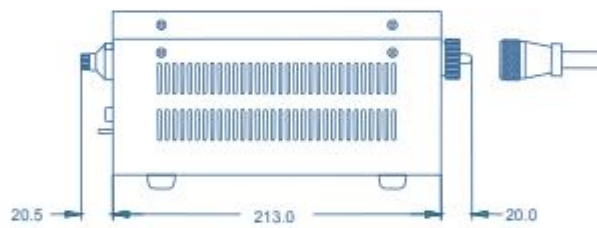
**DS3-11312-101-K635F09FN-0.40W DS3-11312-xxx-LD No.**

**Package Dimensions (mm)**

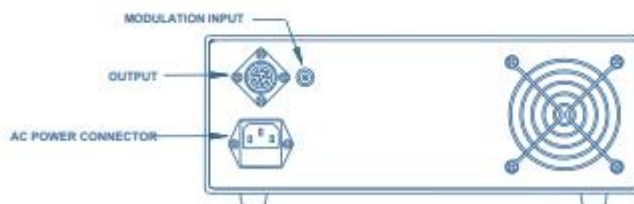
**FRONT VIEW**



**SIDE VIEW**



**REAR VIEW**



Information and specifications contained herein are deemed to be reliable and accurate. BWT Beijing reserves the right to change, alter or modify the design and specifications of these products at any time without notice.

Tel: +86-10-8368 1053	Fax: +86-10-8368 2949	E-mail: sales@bwt-bj.com	URL: www.bwt-bj.com
-----------------------	-----------------------	--------------------------	---------------------

# InGaAs camera C14041-10U



## FEATURES

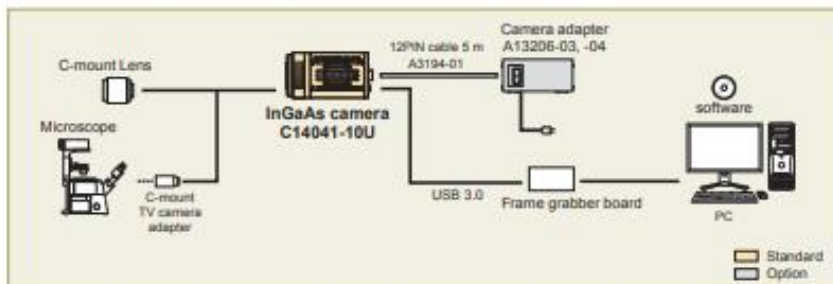
- High sensitivity in the near infrared region
- 320 × 256 pixels
- Low noise and high stability with cooling
- High-image quality rolling shutter mode and the global shutter mode capable of simultaneous exposure to the entire screen mounted
- Frame rate of approx. 216 frames/s (rolling shutter mode)

## APPLICATIONS

- Internal inspections of silicon wafers and devices
- Evaluation of solar cells
- Evaluation and analysis of optical communication devices
- EL/PL image acquisition

The C14041-10U is an InGaAs camera with sensitivity in the near infrared region from 950 nm to 1700 nm. It has a USB 3.0 interface port which supports 14 bit image acquisition and exposure time adjustment. This makes the C14041-10U ideal for use in a wide range of applications including internal inspection of silicon wafers and devices, laser beam alignment and evaluation of solar cells.

## SYSTEM CONFIGURATION



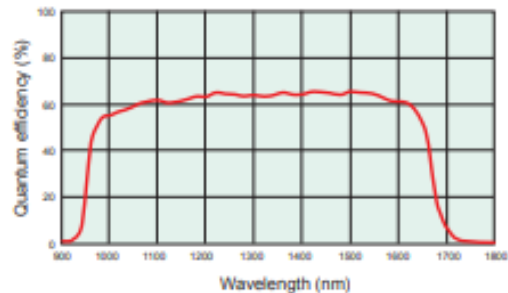
### SPECIFICATIONS

Type number	C14041-10U	
Imaging device	InGaAs sensor	
Effective number of pixels	320 (H) × 256 (V)	
Pixel size	20 μm (H) × 20 μm (V)	
Effective area	8.4 mm (H) × 5.12 mm (V)	
Cooling method	Peltier cooling	
Cooling temperature	Forced-air cooled (Ambient temperature: +25 °C)	+10 °C
Frame rate	Rolling shutter	216.6 frames/s
	Global shutter	214.3 frames/s
Digital output	14 bit	
Exposure time *1	Rolling shutter	4.6 ms to 1 s
	Global shutter	100 μs to 1 s
External trigger input mode	Edge trigger, Level trigger, Start trigger	
Trigger delay function	0 s to 1 s in 10 μs steps	
Trigger input connector	SMA	
Interface	USB 3.0 *2	
Image processing functions	Background subtraction, Shading correction	
Lens mount	C-mount	
Connector	USB 3.0 microB type	
Power supply	DC +12 V	
Power consumption	Approx. 16 W	
Ambient operating temperature *1	0 °C to +40 °C	
Ambient operating humidity	30 % to 80 % (with no condensation)	
Ambient storage temperature	-10 °C to +50 °C	
Ambient storage humidity	90 % max. (with no condensation)	

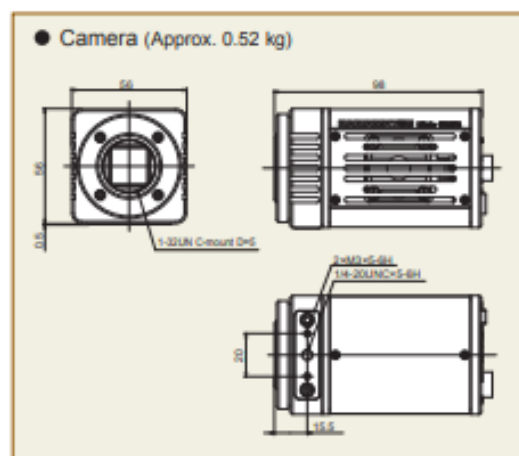
\*1: Depend on the exposure time or ambient temperature, brighter or darker pixels than surrounding area or uneven pattern may appear in the image.  
It comes from the characteristics of InGaAs sensor and not the defects or failure of the camera.

\*2: Equivalent to USB 3.1 Gen 1

### SPECTRAL RESPONSE



### DIMENSIONAL OUTLINES (Unit : mm)



### OPTIONS

- Camera adapter: A13206-03 (for US)  
: A13206-04 (for EU)
- 12PIN cable 5 m: A3194-01

- Product and software package names noted in this documentation are trademarks or registered trademarks of their respective manufacturers.
- Subject to local technical requirements and regulations, availability of products included in this promotional material may vary. Please consult your local sales representative.
- Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions. Specifications and external appearance are subject to change without notice.
- The spectral response specified in this catalog is typical value, it is not guaranteed.

© 2019 Hamamatsu Photonics K.K.

## HAMAMATSU PHOTONICS K.K. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Systems Division

812 Joko-cho, Higashi-ku, Hamamatsu City, 431-3196, Japan, Telephone: (81)53-431-0124, Fax: (81)53-433-8031, E-mail: [export@sys.hpk.co.jp](mailto:export@sys.hpk.co.jp)

U.S.A.: Hamamatsu Corporation, 360 Foothill Road, Bridgewater, NJ 08807, U.S.A., Telephone: (1)908-231-0990, Fax: (1)908-231-1218 E-mail: [usa@hamamatsu.com](mailto:usa@hamamatsu.com)

Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, Arzbergerstr. 10, D-60211 Hensching am Ammersee, Germany, Telephone: (49)6152-375-0, Fax: (49)6152-265-8 E-mail: [info@hamamatsu.de](mailto:info@hamamatsu.de)

France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 19, Rue du Saule Trape, Parc du Moulin de Massey, 91882 Massey Cedex, France, Telephone: (33)1 69 53 71 00, Fax: (33)1 69 53 71 10 E-mail: [info@hamamatsu.fr](mailto:info@hamamatsu.fr)

United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited, 2 Howard Court, 10 Tavist Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1BW, UK, Telephone: (44)1707-294888, Fax: (44)1707-325777 E-mail: [info@hamamatsu.co.uk](mailto:info@hamamatsu.co.uk)

North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB, Tomtehamngatan 35 16440 Kista, Sweden, Telephone: (46)8-509-031 00, Fax: (46)8-509-031 01 E-mail: [info@hamamatsu.se](mailto:info@hamamatsu.se)

Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.r.l.: Strada della Moira, 1 int. 6, 20020 Anzola (Milano), Italy, Telephone: (39)02-93 58 17 33, Fax: (39)02-93 58 17 41 E-mail: [info@hamamatsu.it](mailto:info@hamamatsu.it)

China: Hamamatsu Photonics (China) Co., Ltd.: 1201 Tower B, Jaming Center, 27 Dongganghuan Beilu, Chaoyang District, 100020 Beijing, P.R.China, Telephone: (86)10-6586-6006, Fax: (86)10-6586-2866 E-mail: [hpc@hamamatsu.com.cn](mailto:hpc@hamamatsu.com.cn)

Taiwan: Hamamatsu Photonics Taiwan Co., Ltd.: 8F-3, No.158, Section2, Gongdao 2nd Road, East District, Hsinchu, 300, Taiwan R.O.C. Telephone: (886)3-659-0080, Fax: (886)3-659-0081 E-mail: [info@hamamatsu.com.tw](mailto:info@hamamatsu.com.tw)

Cat. No. SCA50119E04  
JUL2019 HPK  
Created in Japan