



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

---

**Universidad de Valladolid**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

**GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

**Autor: Martínez González, Mario**

**Tutor: Miguel Ángel González Rebollo**

**Departamento de Física de la Materia**

**Condensada, Mineralogía y Cristalografía**

**Valladolid a 29 de Enero de 2015**



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**



**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

**Universidad de Valladolid**

**AGRADECIMIENTOS**

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su realización.

A mi TUTOR Dr. Miguel Ángel Rebollo, por todo el apoyo y dedicación recibidos durante todo este tiempo. Gracias por darme la oportunidad de realizar este trabajo con el que tanto he disfrutado y aprendido.

Al Grupo Optronlab, en especial a Dr. Oscar Martínez que junto con mi tutor han sido las personas que más me han ayudado en el laboratorio y más tiempo han dedicado a compartir sus conocimientos conmigo.

A mi FAMILIA, en especial a mi MADRE María Luisa González, a mi HERMANA Sara Martínez y mi PADRE Ángel Miguel Martínez por su apoyo moral en los momentos más difíciles de la elaboración de este Trabajo.

A mis AMIGOS, y en especial; a José Escanciano, que desde el primer momento se interesó por este trabajo y me prestó toda la ayuda que pudo, a Raúl Fernández y Clara Luís por acogerme los últimos y críticos días antes de la finalización de este trabajo.

Para terminar me gustaría agradecer de una forma más especial a mi PADRE Ángel Miguel Martínez, el cual es la persona que más me ha ayudado y apoyado en la construcción de la máquina. Se puede decir que sin él nunca hubiese podido terminar este Trabajo Fin de Grado.

Y en general a todos los que de alguna manera me han apoyado.



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**





# Índice

<b>Capítulo 1. Resumen y Palabras Clave.....</b>	<b>1</b>
<u>-</u> Resumen.....	1
<u>-</u> Palabras clave .....	1
<u>-</u> Abstract.....	1
<u>-</u> Keywords.....	1
<b>Capítulo 2. Introducción y Objetivos .....</b>	<b>3</b>
<u>-</u> Introducción .....	3
<u>-</u> Objetivos .....	4
<u>-</u> Definición espacial del sistema.....	5
<u>-</u> Tipos de medidas del sistema .....	6
- Fotoluminiscencia .....	6
- Electroluminiscencia.....	8
<b>Capítulo 3. Fundamento Teórico .....</b>	<b>11</b>
<u>-</u> Efecto fotoeléctrico .....	11
<u>-</u> Absorción de luz .....	11
<u>-</u> Recombinación.....	12
<u>-</u> Luminiscencia.....	13
- Fotoluminiscencia .....	14
- Electroluminiscencia.....	14
<b>Capítulo 4. Hardware del sistema .....</b>	<b>15</b>
<u>-</u> Fuente de alimentación .....	15
<u>-</u> Sistema de refrigeración .....	18
<u>-</u> Driver electrónico del láser .....	19
- Descripción de las Conexiones y los Jumpers .....	20
- Descripción del Funcionamiento.....	20
<u>-</u> Conector BOB.....	22
- Conexiones, Interruptores, LEDs y Mandos.....	22



**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

**Universidad de Valladolid**

- Tarjetas de adquisición de datos .....	23
- Láser de diodo .....	25
- Cámara CCD.....	26
- Sistema de control de temperatura de los láseres .....	28
- Sistema de medida de la temperatura ambiente .....	28
<b>Capítulo 5. Software del sistema.....</b>	<b>31</b>
- Software del control de temperatura “PicoLog Recorder” .....	31
- Software de control de la cámara CCD “CamWare” .....	37
<b>Capítulo 6. Estructura y entorno de pruebas del sistema.....</b>	<b>43</b>
- Base de la estructura .....	43
- Armazón de la estructura .....	44
- Armazón del sistema de medida por transmisión.....	44
- Armazón del sistema de medida por reflexión .....	46
- Soporte de las muestras .....	48
- Soporte de las fuentes de alimentación .....	49
- Soporte de los láseres.....	50
- Cuerpo del sistema .....	50
- Sistema de desplazamiento horizontal.....	52
- Sistema de desplazamiento vertical y alabeo .....	56
- Apoyo y agarre de los láseres.....	58
- Sistema de sujeción del soporte de los láseres .....	60
- Capota de protección.....	61
- Bandejas de las tarjetas de adquisición de datos .....	62
<b>Capítulo 7. Cableado del sistema.....</b>	<b>65</b>
- Sistema de alimentación de los láseres .....	65
- Elección de los cables.....	65
- Conexiones del cableado.....	66
- Sistema de control de los láseres .....	68
- Elección de los cables y conexiones .....	69
- Tendido del cableado.....	71



# PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

**Universidad de Valladolid**

- Sistema de alimentación del driver electrónico .....	72
- Cableado de la fuente de alimentación .....	73
- Empalme .....	74
- Cableado adicional .....	75
- Canaletas.....	76
- Colocación del cableado en la canaleta .....	77
- Sistema de alimentación de los dispositivos de refrigeración .....	78
- Cableado de la fuente de alimentación .....	78
- Empalme .....	78
- Cableado adicional .....	78
- Sistema de alimentación y cableado auxiliar de las fuentes de alimentación .....	80
- Cableado de 3.3 V.....	81
- Cableado de encendido .....	82
- Alimentación de las fuentes .....	82
- Sistema de alimentación y datos de la cámara CCD .....	83
- Posición de Transmisión .....	84
- Posición de Reflexión.....	84
- Sistema de comunicación de las tarjetas de adquisición de datos con el ordenador .....	86
- Sistema de comunicación del sistema de control de la temperatura de los láseres .....	87
<b>Capítulo 8. Mediciones .....</b>	<b>89</b>
- Calibración de la cámara CCD .....	90
- Calibración en las medidas por Transmisión.....	90
- Calibración en las medidas por Reflexión .....	92
- Ensayos con células fotovoltaicas.....	95
- Ensayo de fotoluminiscencia.....	95
- Ensayo de electroluminiscencia.....	97
<b>Conclusiones.....</b>	<b>103</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>105</b>



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**



## 1- Resumen y Palabras Clave

### - Resumen

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado consiste en la elaboración y mejora de un sistema de caracterización de obleas y células fotovoltaicas utilizando fotoluminiscencia y electroluminiscencia. Se explicará de forma detallada el equipo utilizado para tal fin así como su instalación en el propio sistema así como el software utilizado para controlarlo. También se hablará sobre la estructura utilizada para dotar de un entorno adecuado para la realización de las medidas y el proceso usado para su construcción. Para finalizar se mostrarán ensayos de caracterización de obleas y células utilizando realizados con el sistema creado y se comentarán los resultados de dichos ensayos.

### - Palabras clave

Fotoluminiscencia, electroluminiscencia, célula fotovoltaica, caracterización y láser.

### - Abstract

The objective of this Final Project involves the development and improvement of a system characterization wafers and photovoltaic cells using photoluminescence and electroluminescence. They explain in detail the equipment used for this purpose and installation in the system itself as well as the software used to control it. It will also discuss the structure used to provide a suitable environment for the realization of measures and the process used for its construction. To conclude wafer characterization tests and using cells made with the system created and the results of these tests will be discussed will be shown.

### - Keywords

Photoluminescence, electroluminescence, photovoltaic cell, characterization and laser.



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

## 2- Introducción y Objetivos

### - Introducción

La fotoluminiscencia y la electroluminiscencia son sistemas de caracterización de obleas y células fotovoltaicas de silicio bastante extendidos debido a su rapidez. Además en el caso de la caracterización por fotoluminiscencia no hace falta contacto físico ni un pretratamiento de las muestras y puede ser utilizado durante todo el proceso de fabricación de las células (obleas y células) y una vez instaladas.

El contexto de este Trabajo Fin de Grado se encuentra en la petición por parte de la empresa DC Wafers, dedicada a la fabricación de células de silicio policristalinas, al grupo Optronlab de la Universidad de Valladolid de un sistema de caracterización de obleas de silicio policristalino debido a problemas de rendimiento de sus células, no obtenían los rendimientos esperados. Dicho sistema se utilizaría para detectar los defectos de las obleas y células y así poder corregir aspectos de su fabricación.

Para dicho propósito se construyó un prototipo de madera en el que se podían realizar medidas de fotoluminiscencia. En las Figuras 2.1 y 2.2 se pueden ver varias imágenes de ese prototipo. El prototipo presentaba problemas de comodidad en la colocación de las muestras, poca estanqueidad respecto a la entrada de luz exterior, un cableado que en ocasiones no cumplía con las secciones adecuadas, una colocación de los láseres que no permitían ningún tipo de calibración, etc. Por tanto el sistema explicado en este Trabajo Fin de Grado está diseñado para solventar todos esos problemas.

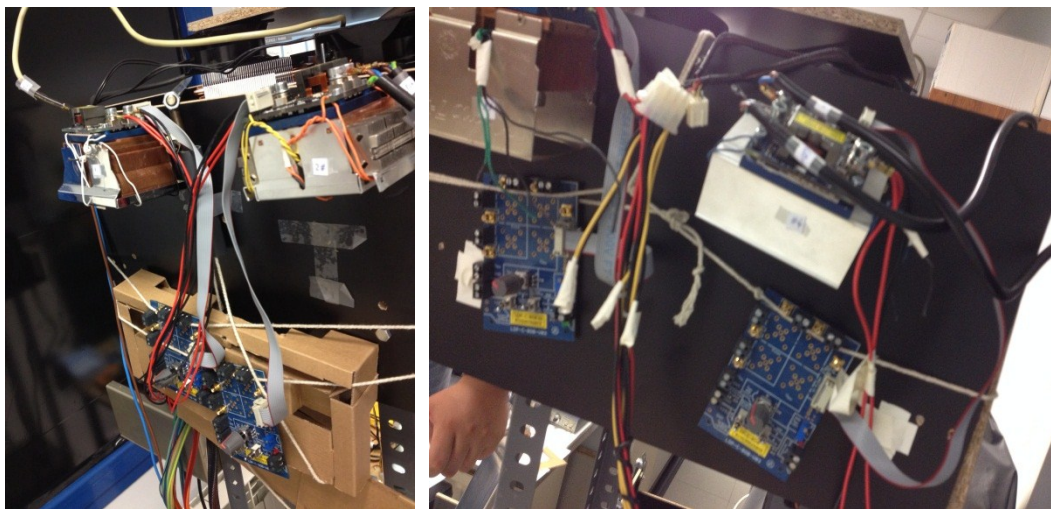
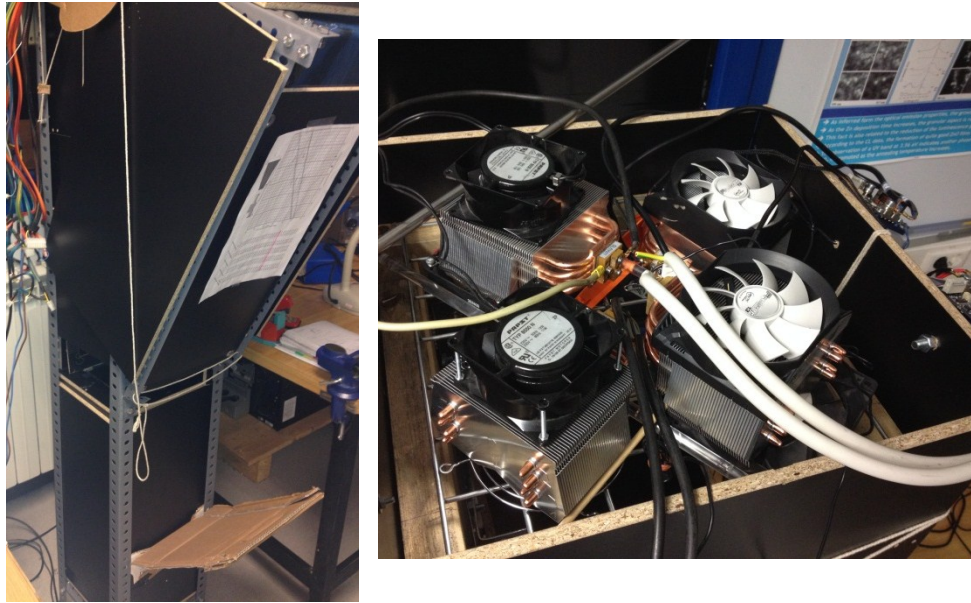


Figura 2.1.- Disposición de los drivers electrónicos y el sistema BOB en el prototipo.



**Figura 2.2.-** Estructura hecha de madera del prototipo (izquierda). Disposición de los láseres en el prototipo (derecha).

El dispositivo construido está pensado para realizar medidas de forma automática y controlada por ordenador mediante el diseño de software propio basado en el programa LabView. La creación de dicho software no es ámbito de este Trabajo Fin de Grado, y se deja abierta la opción de que la programación de dicho software fuese otro posible TFG.

Aunque la creación del software específico para la automatización del sistema no sea ámbito de este Trabajo Fin de Grado. La instalación del hardware y cableado necesario para dicha automatización si se ha efectuado.

### - Objetivos

El objetivo primordial del Trabajo Fin de Grado es la elaboración y mejora del sistema de caracterización de obleas y células fotovoltaicas de silicio policristalino para identificar posibles defectos que afectasen al rendimiento de los equipos fotovoltaicos. Utilizando los sistemas de caracterización mediante la captura de emisión de luminiscencia, tanto foto como electroluminiscencia. En la elaboración del sistema se tendrá en cuenta no encarecer el sistema por lo que se utilizarán todos los materiales reciclados posibles. Gran parte de los materiales utilizados en la construcción de la estructura y en la instalación del cableado son reciclados.

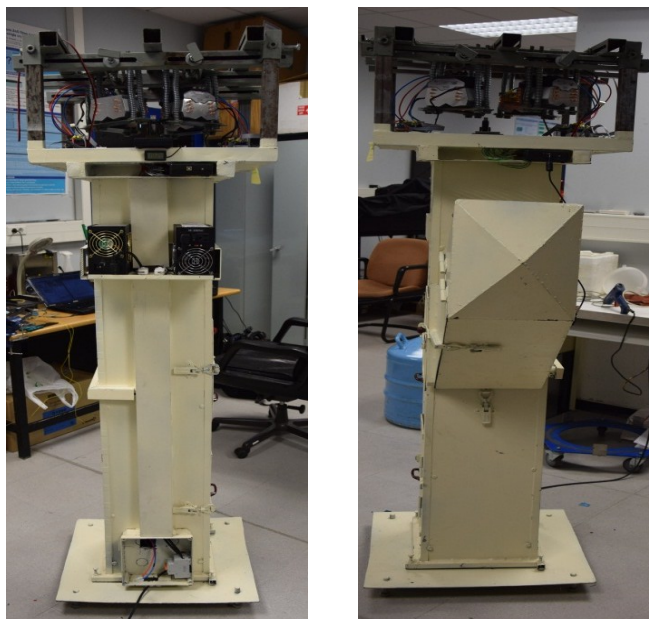


En la realización del siguiente Trabajo Fin de Grado se ha hecho hincapié en una explicación exhaustiva del sistema en general. Esta exhaustividad en las explicaciones está motivada para facilitar la reparación y el mantenimiento de los componentes del sistema. Ya que las personas que utilicen este dispositivo no tienen por qué conocer el sistema tan profundamente como yo. Además el diseño entero de la máquina se efectuado de forma muy cuidadosa y minuciosa. Utilizando códigos de colores y evitando posibles confusiones o malentendidos a la hora de efectuar reparaciones o mantenimientos. Además se ha efectuado un gran esfuerzo en la recopilación de manuales y datasheet de los componentes utilizados para facilitar la tarea desarrollo de software de automatización.

#### - Definición espacial del sistema

A lo largo del presente trabajo se hablará sobre la estructura del sistema. Para situar cada parte en el espacio nos referiremos a la parte frontal y posterior, así como la parte izquierda y la derecha de la máquina. Se utilizará este código para facilitar la comprensión y la visualización espacial de la estructura del sistema y así entender mejor su funcionamiento. En la Figura 2.3 se pueden ver la parte delantera y trasera del sistema.

Este sistema de definición espacial del sistema se aplicará también a los dispositivos utilizados. Definiendo la posición de cada uno acorde a su posición respecto a este sistema de definición.



**Figura 2.3.-** Imagen en la que podemos diferenciar la parte frontal del sistema (izquierda). Parte posterior del sistema (derecha).

Las partes laterales del sistema se denominan derecha e izquierda. En la Figura 2.4 se pueden ver las dos partes.



**Figura 2.4.-** Imagen de las partes laterales del sistema. Parte izquierda del sistema (izquierda). Parte derecha del sistema (derecha).

- Tipos de medidas del sistema

El sistema está preparado para caracterizar tanto obleas de silicio como células fotovoltaicas. El problema es que las características de las obleas y de las células ya montadas no son las mismas y hay que adaptar el ensayo de manera que se adapte a las características de ambas. Además aprovechando que el entorno de pruebas de la foto y la electroluminiscencia son parecidos (entornos de poca luz ambiental), se podrán realizar ensayos tanto de uno como de otro variando únicamente el sistema de excitación. Hay que tener en cuenta que las pruebas de electroluminiscencia sólo se podrán efectuar sobre células fotovoltaicas, ya que en las obleas de silicio no se puede realizar la conexión eléctrica necesaria (polarización de la unión p-n).

o Fotoluminiscencia

Para el caso de excitación mediante fotoluminiscencia, esta se conseguirá mediante la utilización de una fuente de luz monocromática compuesta por 4 láseres. Dicha luz deberá incidir homogéneamente sobre la muestra (obleas



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

de silicio de 156 X 156 mm). Utilizando una cámara CCD con la capacidad de recoger el rango de longitud onda de la fotoluminiscencia emitida, la cual mostrará en una imagen dicha fotoluminiscencia.

En la caracterización de células solares ya acabadas se utilizará el método de caracterización por reflexión. En este sistema la excitación de portadores mediante los láseres se efectuará por la misma superficie por la que se capturará la fotoluminiscencia. En la Figura 2.5 se puede ver un esquema de la disposición de captura por reflexión.

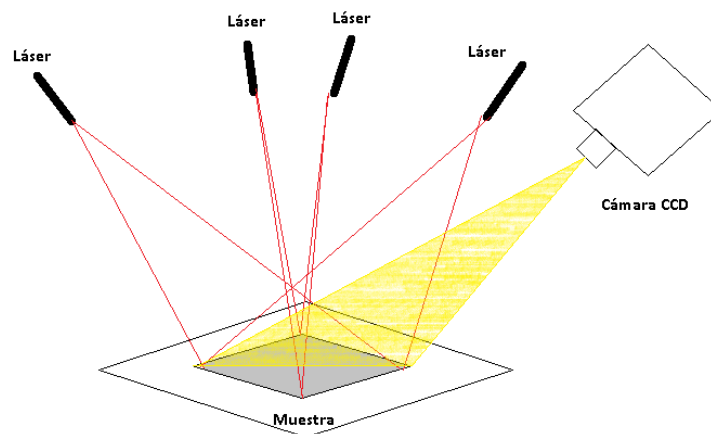


Figura 2.5.- Disposición para la captura de imágenes mediante reflexión.

La utilización de esta disposición se realiza debido a que la superficie de las células está tratada de manera que se minimice tanto la recombinación superficial, aumentando la intensidad de luminiscencia, como la reflectividad. De esta forma la luz láser reflejada no interferirá con la señal de fotoluminiscencia, ya que la luz reflejada sobre la superficie de la célula se efectúa de forma direccional, con la misma dirección que los haces de láser. En cambio la emisión de fotoluminiscencia se produce de forma difusa. Por tanto la cámara se dispone en forma de ángulo, como se puede ver en la Figura 2.5.

Por tanto las características anteriores permiten que aun captando poca fotoluminiscencia las imágenes obtenidas muestren los defectos de la célula con tiempos de ejecución de la medida en torno a 1 segundo. En esta disposición el entorno de oscuridad absoluta no es necesario debido a los tiempos de captura tan reducidos. Para las obleas de silicio se utilizará el método de caracterización por transmisión. En este sistema la excitación de portadores mediante los láseres se efectuará por la superficie opuesta a la de la captura de la fotoluminiscencia. En la Figura 2.6 se puede ver un esquema de la disposición de captura por reflexión.

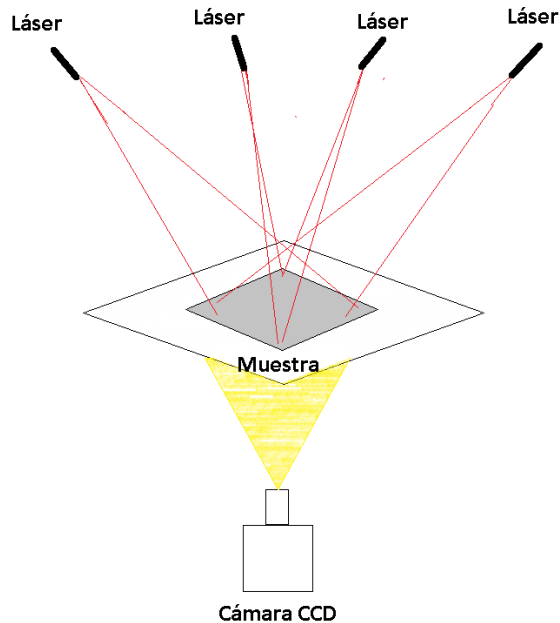


Figura 2.6.- Disposición para la captura de imágenes mediante transmisión.

La utilización del sistema de captura de fotoluminiscencia por transmisión se debe a que las obleas presentan una superficie con una reflectividad bastante mayor que las células fotovoltaicas por lo que la cámara captaría la reflexión de los haces de láser y se falsearían las medidas. A diferencia de las células, la superficie de las obleas no tiene ningún tratamiento de pasivación, por lo que la recombinación superficial es elevada y por ende disminuye la intensidad de la luminiscencia.

Las imágenes tomadas mediante transmisión presentarán varios problemas. Por una parte los elevados tiempos de captura, que pueden llegar a los 90 segundos para conseguir imágenes de una nitidez aceptable. Este gran intervalo de tiempo obliga a que el entorno de adquisición tenga que ser lo más estanco posible, ya que la luz exterior puede alterar significativamente los resultados, llegando incluso a ocultarlos completamente. Esa ha sido la razón para diseñar un dispositivo que impida entrar a la luz externa y que a la vez no dificulte las medidas y el cambio de las muestras.

- Electroluminiscencia

Para la caracterización mediante electroluminiscencia la excitación de los portadores se consigue mediante la polarización en directa de la unión p-n de la célula fotovoltaica. Para conseguir esto se ha dispuesto del cableado necesario dentro del propio sistema y se utilizará una fuente de alimentación

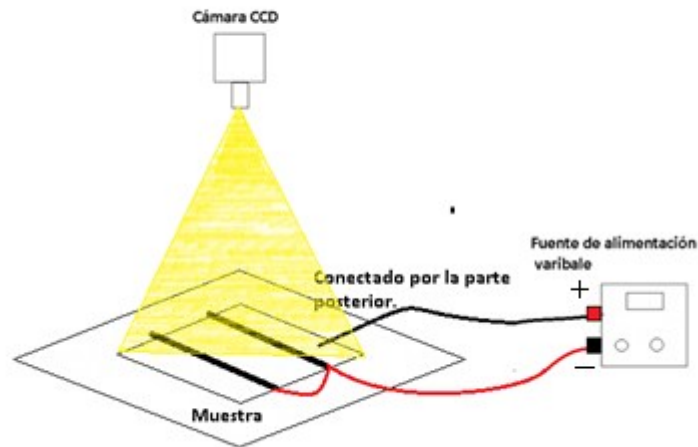


## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

variable externa, a la que se le efectuarán las conexiones necesarias cada vez que se realice una medida. La recogida de las imágenes se efectuara con la misma cámara CCD que la utilizada para la fotoluminiscencia.

Para la captura de imágenes se utilizará la misma posición de la cámara que la utilizada en las medidas por reflexión de fotoluminiscencia. De manera que la imagen obtenida se produzca por la parte superior. En la Figura 2.7 se puede ver la disposición para los ensayos de electroluminiscencia.



**Figura 2.7.-** Disposición para la captura de imágenes mediante electroluminiscencia.

Este sistema de caracterización es mucho más sencillo que la fotoluminiscencia debido a que la captura de la luminiscencia emitida es mucho menos problemática ya que no hay que eliminar la luz reflejada y la emisión de luminiscencia tiene un mayor rendimiento.



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**



### 3- Fundamento Teórico

En este capítulo se expone información sobre los fenómenos físicos que se producen cuando sobre el silicio se proyecta un haz de luz. También se hablará sobre el efecto fotoeléctrico, la recombinación de pares electrón-hueco y la luminiscencia. Procesos que intervienen en la caracterización de células y obleas.

#### - Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones de un material como resultado de la interacción de una radiación electromagnética como la luz del sol con dicho material.

Cualquier radiación electromagnética se puede ver como una composición de unas partículas denominadas fotones, los cuales son los encargados de transportar la energía. Dichas partículas tienen una forma de onda la cual se encuentra caracterizada por la longitud de onda,  $\lambda$ , ésta determina la cantidad de energía que transporta el fotón,  $E_f$ , estando relacionada de la siguiente manera

$$E_f = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck y  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. Solamente los fotones cuya energía sea superior a la energía de la banda prohibida serán capaces de crear un par electrón-hueco.

#### - Absorción de luz

Los semiconductores a diferencia de los metales muestran la capacidad de absorción de luz. Esta absorción de luz se produce para fotones cuya longitud de onda y por tanto su energía asociada es mayor que la de la banda prohibida. Dicha luz es absorbida casi por completo, siempre dependiendo del grosor del material.

En el caso de longitudes de onda largas, con la energía del fotón,  $E_f$ , pequeña e inferior a la energía de la banda prohibida, no se produce una gran absorción por lo que se podría decir que el semimetal se comportaría como un material transparente. Por ejemplo para el Germanio esta banda se encuentra en  $\lambda = 0.66 \mu m$ , para el Carburo de Silicio  $\lambda = 2.86 \mu m$  y para el Silicio  $\lambda = 1.11 \mu m$ .



El proceso de creación de pares electrón-hueco a través de la absorción de energía de los fotones es esencial en el funcionamiento de células solares fotovoltaicas. La excitación de un electrón directamente desde la banda de valencia, en la que se crea un hueco, a la banda de conducción se denomina absorción fundamental.

En semiconductores de banda indirecta como el silicio el proceso de absorción de luz involucra una partícula adicional, el fonón. Los fonones son partículas que al igual que los fotones transportan energía. Esta energía es la que corresponde a las vibraciones de la red cristalina. Estas partículas son necesarias para la conservación del momento del electrón.

### - Recombinación

Cuando a un material semiconductor se le saca del equilibrio térmico, las concentraciones de huecos y electrones tienden a llegar al estado de equilibrio mediante el proceso de recombinación, el cual consiste en que un electrón situado en la banda de conducción pasa a la banda de valencia, por lo que eliminaría un hueco. Hay varias formas por las cuales se produce la recombinación: recombinación a través de defectos con niveles en la banda prohibida, recombinación radiativa y recombinación Auger. Los diferentes procesos de recombinación se podrán ver ilustrados en la Figura 3.1.

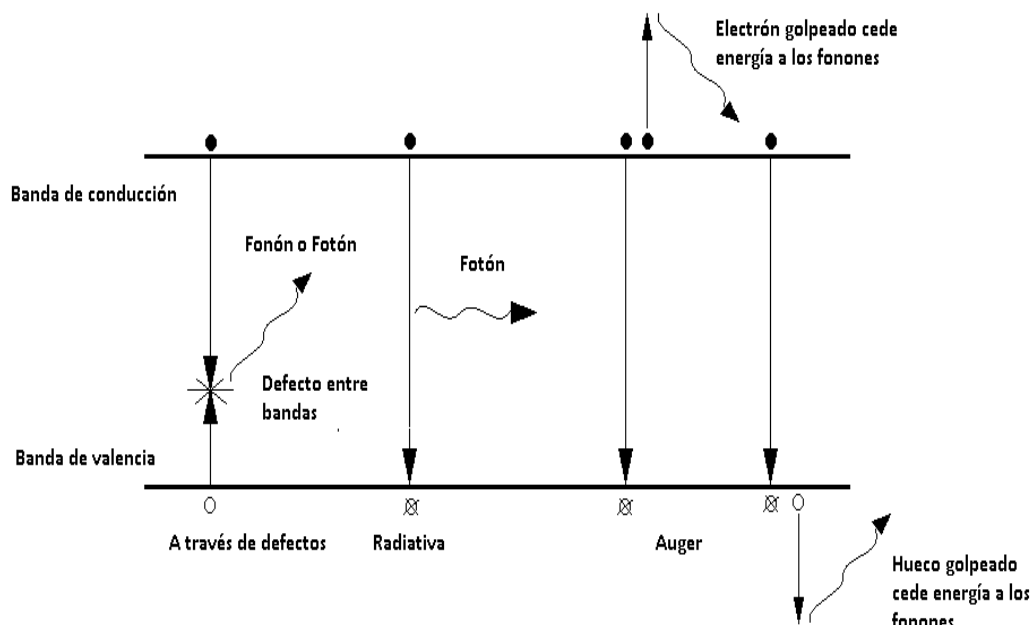


Figura 3.1.- Procesos de recombinación a través de defectos y radiativa en semiconductores.





- Recombinación radiativa

La recombinación radiativa es el proceso inverso a la generación de pares electrón-hueco mediante excitación óptica. Cuando se produce la recombinación radiativa, la energía que se desprende lo hace en forma de emisión de fotones.

Los fotones con energías parecidas a las de la banda prohibida que son emitidos durante el proceso de recombinación pueden ser reabsorbidos antes de salir del semiconductor.

- Recombinación a través de defectos con niveles en la banda prohibida

La recombinación a través de defectos se produce en defectos de la estructura cristalina, los cuales se encuentran a nivel energético dentro de la banda prohibida.

En este tipo de recombinaciones la energía perdida por el electrón se puede ceder a la red cristalina a través de un fonón o ceder esa energía en forma de fotón. La energía de ese fotón no será la misma que la emitida en el proceso de recombinación radiativa ya que el estado energético en el que se encuentra el defecto no es el mismo que la banda de valencia.

- Recombinación Auger

La recombinación Auger se produce cuando un electrón excitado en la banda de conducción choca contra otro electrón u otro hueco. Cuando se produce ese choque el electrón cede energía al hueco o el electrón con el que ha chocado y este a su vez libera el exceso de energía a la red cristalina a través de fonones.

Estos dos últimos dos tipos de recombinación son los más habituales en los semiconductores de banda indirecta como el silicio.

- Luminiscencia

Es el fenómeno de emisión de luz por sólidos o moléculas los cuales se encuentra excitados por una fuente externa, dicha excitación eleva a los electrones a estados de excitación los cuales al volver a su estado de equilibrio emiten luz.

Hablando de semiconductores, 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 pico de intensidad para la energía de la banda prohibida  $h\nu \cong E_g$ , esto es producido a la recombinación de electrones en 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, por ende no son intrínsecos a la naturaleza del semiconductor. Estas bandas de emisión se activan por átomos de impurezas y otros defectos, la emisión será característica de la propia impureza.

- 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 se produce la recombinación radiativa de un par electrón-hueco y se emite un fotón. Ese fotón es lo que denominaremos fotoluminiscencia.

- Electroluminiscencia

La 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 radiativa emite luminiscencia, la cual denominaremos electroluminiscencia.



## 4- Hardware del sistema

En este apartado se describen los componentes físicos del sistema de medida, así como su función.

### - Fuente de Alimentación

La alimentación de los diodos de alta potencia requiere fuentes de alimentación capaces de aportar un gran amperaje. Los drivers utilizados para gestionar la intensidad por los diodos están alimentados a +5V y los ventiladores utilizados en el sistema de refrigeración de los laser están alimentados a +12V.

Por tanto se pueden utilizar PSUs (Power Supply Unit, en sus siglas en ingles) de ordenadores personales, ya que estas cumplen las especificaciones tanto de voltajes necesarios, estas PSUs generan tensiones de  $\pm 3.3$ ,  $\pm 5$  y  $\pm 12$  V; alcanzan potencias superiores a los 400 W y poseen una gran estabilidad en la tensión y corriente de salida, lo que evita el uso de fuentes de alimentación programables o fuentes de alta potencia. Al utilizar estas PSUs conseguimos abaratar el precio global del sistema de medida ya que son dispositivos muy corrientes.

Los cuatro láseres que utilizaremos en el sistema de medida se podrán alimentar con sólo dos fuentes de alimentación. Una característica deseable en nuestra fuentes será una gran estabilidad tanto en la tensión como en la corriente de salida, ya que variaciones en la potencia de salida conllevaría variaciones en la iluminación proporcionada por los laser, lo que podría concurrir a fallos sistemáticos en el mapeado, además de un posible daño de los sistemas electrónicos.

Como ya se comentó con anterioridad las fuentes de alimentación utilizadas en ordenadores personales suelen tener potencias superiores a los 400 W, siendo la salida de 12 V la que mayor potencia suministra, pero las fuentes que más adecuarían serían las específicas para consumos de 5 V, alimentaciones de puertos USB y discos duros.

Las fuentes de alimentación utilizadas en el sistema son una VANTEC modelo VAN420A y una Thermaltake Purepower-560APD. Las características de las fuentes de alimentación están en las Tablas 4.1 y 4.2. y en la Figura 4.1 se pueden ver las dos fuentes de alimentación utilizadas.



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

Tensión de Salida DC (V)	Corriente Mínima (A)	Corriente Máxima (A)	Máxima Combinada (W)	Potencia
+12V	0.0 A	18.0 A	216 W	400 W
+5 V	0.1 A	42.0 A	220 W	
+3.3 V	0.3 A	26.0 A	220 W	
-12 V	0.0 A	0.8 A	12 W	28 W
-5 V	0.0 A	1.0 A	4 W	
+5 VSB	0.0 A	2.5 A	12.5 W	

Tabla 4.1.- Características de la Fuente VANTEC modelo VAN420A

Tensión de Salida DC (V)	Corriente Mínima (A)	Corriente Máxima (A)	Máxima Combinada (W)	Potencia
+12V	0.0 A	22 A	264 W	496 W
+5 V	1.0 A	40 A	250 W	
+3.3 V	0.3 A	30 A	250 W	
-12 V	0.0 A	1.0 A	12W	24.5 W
-5 V	0.0 A	0.5 A	2.5 W	
+5 VSB	0.0 A	2.0 A	10 W	

Tabla 4.2.- Características de la Fuente Thermaltake Purepower-560APD



Figura 4.1.- Fuente de alimentación Thermaltake Purepower-560APD (derecha), Fuente de alimentación VANTEC VAN42A (izquierda), ya instaladas en el sistema. También se pueden ver los interruptores adicionales situados entre ambas fuentes utilizados para el control del encendido de las mismas.

Para lograr esa estabilidad tanto en la tensión como en la corriente de salida, necesitaremos establecer cierta corriente mínima por las diferentes salidas, dichas corrientes ya están expuestas en las tablas anteriores, como se puede observar solo será necesario mantener cierta corriente mínima en las tensiones de +12, +5 y +3.3 V, en el caso de +12 V la corriente mínima se conseguirá conectando el sistema de refrigeración de los laser que funciona a +12 V, en el caso de los +5 V se conseguirá conectando el sistema de alimentación de los laser y para el de +3.3 V se utilizarán resistencias para

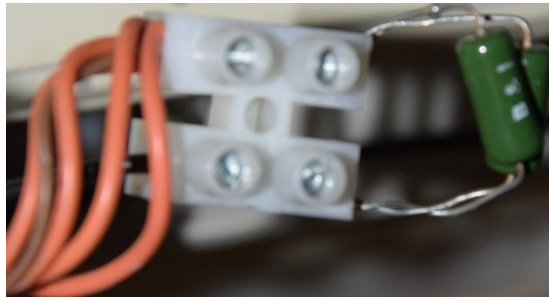


## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

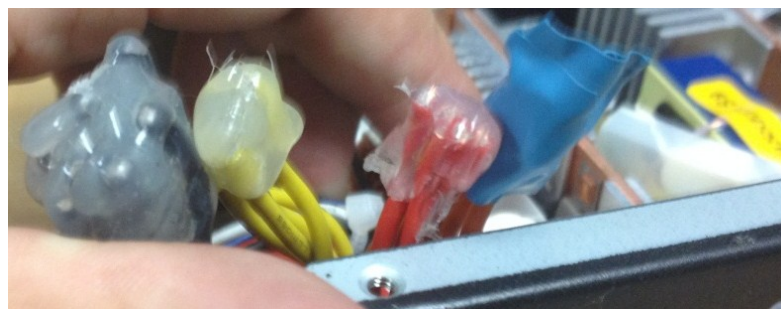
conseguir dicha corriente mínima. En la Figura 4.2 se muestran las resistencias utilizadas para conseguir dicha corriente mínima.

Para que estas fuentes de alimentación funcionen han de tener en cortocircuito la salida de control, que normalmente es de color verde, con masa. Utilizando esto se han incluido dos interruptores, uno para cada fuente de alimentación, que controlan dicho cortocircuito. En la Figura 4.3 se pueden observar los interruptores utilizados y su disposición respecto al soporte de las fuentes, colocadas en el espacio entre ambas.



**Figura 4.2.-** Resistencias utilizadas para establecer la corriente mínima necesaria en la salida de 3.3 V.

Las Fuentes de alimentación usadas, estaban previstas para ser utilizadas en ordenadores de sobremesa, por lo se ha dispuesto a la eliminación de salidas innecesarias para ahorrar espacio en las vías por las que discurren los cables. Se han eliminado cortando e aislando los cables mediante una pistola termoselladora de silicona para evitar posibles cortocircuitos y derivaciones, además se han cubierto de cinta aislante para evitar el desgaste de la silicona. En la Figura 4.3 se puede apreciar el procedimiento efectuado.



**Figura 4.3.-** Aislamiento de los cables innecesarios de las fuentes de alimentación.

- **Sistema de refrigeración**

Los diodos laser tienen una potencia máxima de unos 55 Watios con una corriente máxima de 25 A, por tanto al pasar una cantidad tan elevada de amperios, se calentarán bastante, por lo que habrá que utilizar un sistema de refrigeración capaz de disipar todo ese calor para evitar que el láser se dañe. El sistema de refrigeración elegido ha sido el conjunto disipador de calor y ventilador Arctic Freezer 13, las características del mismo se exponen en la Figura 4.4

Capacidad de Refrigeración Máx.	200 W
Dimensiones	123 x 96 x 130 mm
Velocidad del Ventilador	60 - 200 rpm
Nivel de Ruido	0.5 Sone a 2000 rpm
Corriente Nominal	0.18 A
Voltaje Nominal	12 V
Potencia Consumida	2.28 W
Peso	0.695 Kg
Estructura	Aletas de aluminio 45x0.5 mm



**Figura 4.4-** Características del disipador y del ventilador, proporcionadas por el fabricante. Aspecto físico del conjunto disipador de calor Arctic Freezer 13 utilizado.

Para efectuar la unión entre el disipador y la carcasa del láser, manteniendo un intercambio de calor apropiado, se ha utilizado el pegamento térmico ARTIC SILVER utilizado en ordenadores personales. El pegamento térmico en cuestión es Artic Silver Termal Adhesive que consta de dos componentes. Este pegamento está compuesto de plata micronizada en un 99.8 % conteniendo entre un 62% y un 65% de plata contenido en peso. El rango de temperaturas en las que es apto su funcionamiento es entre -40°C a 150°C, ya que a temperaturas inferiores a 0°C se cristalizan sus componentes y se debilita la unión. Este pegamento térmico no conduce la electricidad. En la Figura 4.5 se puede ver el pegamento térmico utilizado.



**Figura 4.5.-** Adhesivo térmico Artic Silver Termal Adhesive utilizado en la unión entre el disipador de calor y el diodo laser.





- **Driver electrónico del láser**

La corriente que circula por los láseres debe ser regulada y adaptada, ya que la salida directa de la fuente de alimentación no es la correcta para el funcionamiento adecuado de los láseres. Esta necesidad de regulación es debida a que los láseres no funcionarán a máxima potencia todo el tiempo, ya que solo hará falta que proporcionen toda su potencia lumínica durante unos segundos en cada medida. Además, queremos que tanto la tensión como la corriente en los láseres sea lo más estable posible, como ya se apuntó con las fuentes de alimentación, absorbiendo y controlando los picos y los transitorios rápidos limitando la corriente máxima que podría circular por el láser.

Como ya se ha comentado antes, los drivers se encuentran entre el láser y la fuente de alimentación y son los encargados de adaptar los 5 V de la salida de la fuente en los <1.8 V (voltaje del láser). El dispositivo utilizado es el modelo LDP-C 40-05 de PICOLAS. En la Figura 4.6. se pueden ver las características más destacables del driver, así como su aspecto físico.

Corriente de Salida	1 - 40 A
Rizado de Corriente	< 400 mA
Frecuencia de Rizado	> 200 kHz
Tiempo de Establecimiento de Corriente	< 60 $\mu$ s
Sobrepico de Corriente	< 1 %
Voltaje de Entrada	4 - 6 V
Temperatura de Funcionamiento	0 - +55 °C
Potencia Máxima de Disipación	30 W
Dimensiones	60.9 x 57.8 x 54 mm
Peso	194 g



Figura 4.6.- Características del driver electrónico y el aspecto físico del dispositivo utilizado, el LDP-C 40-05.

Este dispositivo gestionará una gran cantidad de corriente continua, por lo que se han dispuesto disipadores de calor en la base del dispositivo con la misión de refrigerar el calor generado por dicha corriente. La unión de los drivers al disipador se ha efectuado mediante el pegamento térmico Artic Silver Termal Adhesive que utilizamos para fijar los dispositivos láser a sus respectivos sistemas de refrigeración y del que ya se habló con anterioridad. En la Figura 4.7. se pueden apreciar los drivers ya unidos a sus respectivos disipadores.

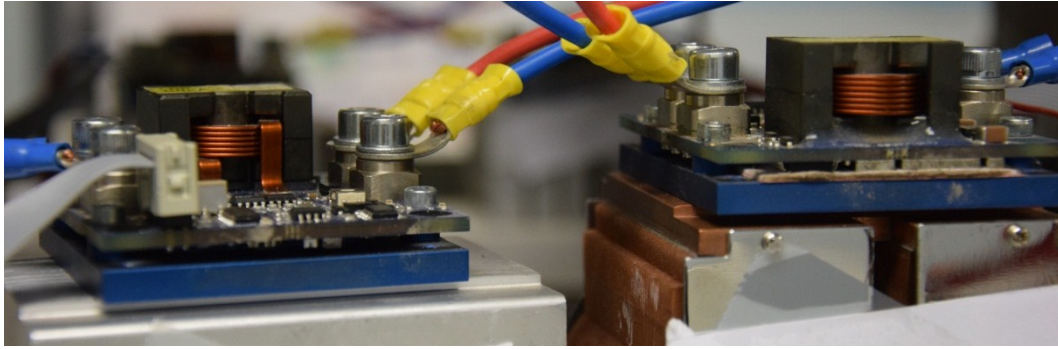


Figura 4.7.- Drivers electrónicos unidos a sus respectivos disipadores.

- Descripción de las Conexiones y los Jumpers

-

A continuación en la Figura 4.8 se describirán las diferentes conexiones y jumpers que se utilizan para calibrar y efectuar las conexiones del sistema.

Conector LDP-C BOB	Conexión del BOB (Break-out Board) de control del láser.
+5 V	Voltaje de entrada.
GND	Masa de entrada.
LD+	Salida positiva al laser (ánodo).
LD-	Salida negativa al laser (cátodo), no debe conectarse a masa.
$I_{limit}$	Limita la corriente que entrega el driver.

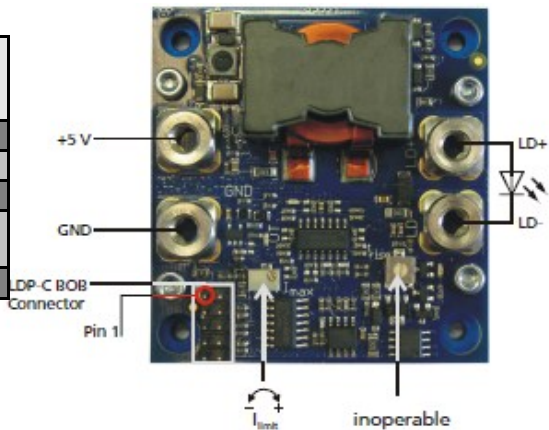


Figura 4.8.- En esta figura se exponen las diferentes conexiones y jumpers del dispositivo así como su cometido proporcionado por el fabricante.

- Descripción del Funcionamiento

El funcionamiento del driver está basado en un convertidor Buck o reductor. Este tipo de convertidor DC/DC sin aislamiento galvánico que obtiene a su salida una tensión continua de menor magnitud que a la entrada. Dicho convertidor (S1, S2, D1, D2, LH), genera una corriente en el inductor LH. Esta corriente es conducida a masa a través del mosfet S3. Durante un pulso, S3 está abierto y la corriente fluye hacia el láser de diodo (LD). La corriente a través del inductor LH es medida a través del RS1.



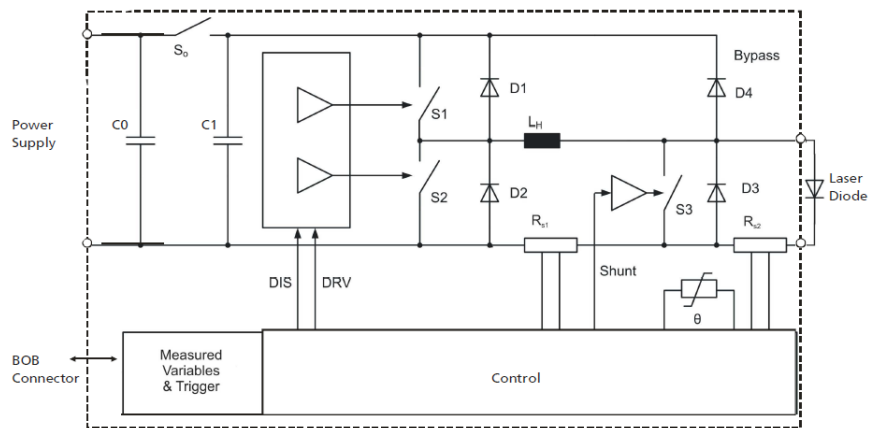


Figura 4.9.- Esquema de los componentes del driver, basado en el convertidor Buck proporcionado por el fabricante

Elemento	Función
S0	Interruptor de seguridad.
C1, S1, S2, D1, D2	Convertidor Buck.
C0	Buffer capacitor de entrada.
S3	Mosfet de derivación de salida.
D3, D4	Protección de láser.
RS1	Sensor de corriente para regulación. (Control)
RS2	Monitorización de la corriente por el láser.
$\theta$	Sensor de temperatura.

Tabla 4.3.- Síntesis de los elementos principales del driver y su función.

Mediante el sistema anterior el circuito de control es capaz de regular la corriente a un valor continuo y constante. La corriente que transcurre a través del láser se mide mediante RS2. Los condensadores de bloqueo separan el driver de la fuente de alimentación. El condensador C1 filtra los rizados de alta frecuencia del convertidor Buck. La corriente del inductor, la corriente por el diodo láser y el voltaje son pre-procesados y se controlan mediante el sistema BOB que se puede conectar de manera externa al driver. Existen medidas de seguridad que protegen tanto al driver como al láser de corrientes en inversa a través de D3, de fallos de carga a través de D4 y para proteger al láser durante el arranque S0 permanece abierto hasta que se ha alcanzado el voltaje adecuado. Además existe un mecanismo de arranque suave, aumenta lentamente la corriente después de un apagado brusco por calentamiento o en el proceso de arranque en la Figura 4.9 y en la Tabla 4.3 se muestran el esquema de componentes y su función.

- Conector BOB (Break out Board)

El sistema BOB es un elemento de regulación del láser, no es imprescindible para que funcione el driver, pero en el caso de querer un control y una monitorización del estado del láser mediante algún tipo de software, es muy recomendable. El dispositivo utilizado es el LDP-C-BOB de PICOLAS, Figura 4.1, adquirido para utilizarlo junto al driver.

Alimentación	La suministra el propio driver
Dimensiones	67 x 100 x 32 mm
Peso	54 g
Temperatura de funcionamiento	-20 a +55 °C

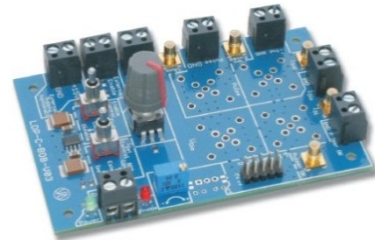


Figura 4.10- Características del sistema BOB y el aspecto físico del dispositivo.

El sistema BOB es el encargado de regular la corriente por el driver, tanto de forma manual a través del potenciómetro o de forma automática a través de una señal analógica externa.

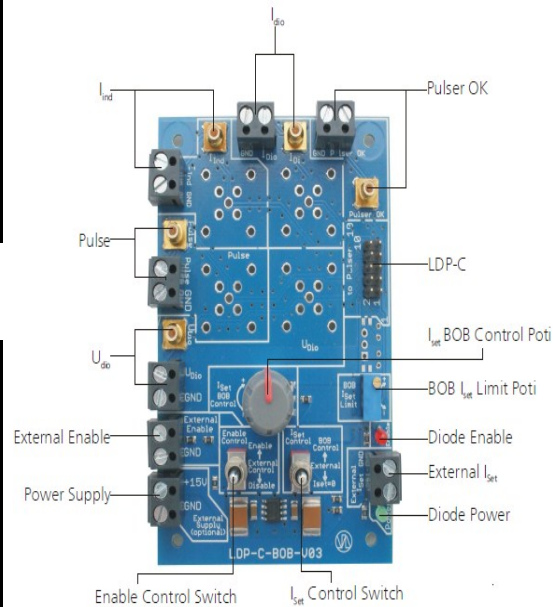
Mediante el uso del mando del potenciómetro se puede ajustar de manera rápida la corriente por el láser. El dispositivo permite monitorizar varias señales del driver, así como la corriente por el láser o la corriente por el inductor. Para ello dispone de varias salidas analógicas cuya salida tiene una relación directa con la señal que se quiere monitorizar.

- Conexiones, Interruptores, LEDs y Mandos

En el propio dispositivo existen dos interruptores; en uno de ellos se controla el estado del dispositivo, encendido o apagado o una tercera opción en la que el estado del dispositivo se controla de forma externa, este control externo se realiza mediante una entrada digital propia del dispositivo y en el otro, se controla el sistema de regulación de la corriente que circularía por el láser que puede ser 0, control manual mediante el potenciómetro o un control externo efectuado mediante una entrada analógica propia del dispositivo. La alimentación del dispositivo se efectúa a través del propio driver. En la Figura 4.11 se explica mediante una imagen del dispositivo y un breve resumen de cada parte del dispositivo.

<b>LDP-C</b>	Conector mediante una clavija de 10 pines al driver, hay que tener cuidado con la polaridad.
<b><math>I_{Dio}</math></b>	Conector de dos pines de salida analógica de la señal de corriente por el diodo láser.
<b><math>I_{Ind}</math></b>	Conector de dos pines de salida analógica de la señal de corriente por el inductor.
<b><math>U_{Dio}</math></b>	Conector de dos pines de salida analógica de la señal de tensión en el diodo láser.
<b>External Enable</b>	Conector de dos pines de entrada digital de la señal de activación del sistema BOB.
<b>External <math>I_{Set}</math></b>	Conector de dos pines de entrada analógica de la señal de regulación de la corriente por el diodo láser.

<b>LED de Alimentación</b>	Está encendido cuando el sistema está alimentado.
<b>LED de Activación</b>	Está encendido cuando el sistema está activado.
<b>Interruptor de control de activación</b>	Posición superior: sistema activado independiente de la señal externa. Posición media: activación del sistema conectado a la activación externa. Posición inferior: sistema desactivado independiente de la señal externa.
<b>Interruptor de control de <math>I_{Set}</math></b>	Posición superior: control de la corriente regulada por el mando del BOB. Posición media: control de la corriente regulada externamente. Posición inferior: la corriente esta desactivada, 0 A.
<b>Ruleta del límite de la corriente</b>	Esta ruleta establece la máxima potencia que proporciona el driver.



**Figura 4.11.-** Esquema de las partes más importantes del sistema BOB y tabla resumen de las diferentes partes

**- Tarjetas de adquisición de datos**

Se han añadido las tarjetas de adquisición de datos para poder automatizar el proceso de toma de medidas, debido a la utilización de 4 láseres y de la necesidad de controlar y monitorizar las variables de todos los láseres se han utilizado dos tarjetas de adquisición de datos, una DT9804 y una DT9802 ya que con una sola tarjeta no tiene las suficientes entradas analógicas necesarias para monitorización del láser.



**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

**Universidad de Valladolid**

Al pertenecer a la misma serie, DT9800, y ser del mismo fabricante, DATA TRANSLATION, no existe ninguna incompatibilidad entre ellas, la única diferencia es la resolución de las señales, es decir una será más precisa que la otra. Esto no supondrá ningún problema ya que la precisión requerida se alcanza de manera satisfactoria con las dos.

Los dispositivos elegidos son una DT9804 y una DT9802, ambas del fabricante DATA TRANSLATION, en la Figura 4.12 se muestran las características de ambos dispositivos.

Modulo	DT9802	DT9804	
<b>Entradas analógicas</b>	<b>Canales</b>	16 modo común/8 diferenciales	16 modo común/8 diferenciales.
	<b>Resolución</b>	12 bits	16 bits
	<b>Rango de Entrada</b>	$\pm 1.25, \pm 2.5, \pm 5, \pm 10, 0-1.25, 0-2.5, 0-5$ y $0-10$ V	$\pm 1.25, \pm 2.5, \pm 5$ y $\pm 10$ V
	<b>Rendimiento</b>	100 kS/s	100 kS/s
<b>Salidas analógicas</b>	<b>Canales</b>	2	2
	<b>Resolución</b>	12 bits	16 bits
	<b>Rango de Salida</b>	$\pm 5, \pm 10, 0-5$ y $0-10$ V	$\pm 10$ V
	<b>Frecuencia de Salida</b>	50 Hz	50 Hz
<b>E/S Digitales</b>	<b>Líneas de E/S</b>	16	16
	<b>Contadores/Temp.</b>	2	2



**Figura 4.12-** Características de las dos tarjetas de adquisición de datos DT9804 y DT9802 y el aspecto físico de ambas.

Utilizando el dispositivo LDP-C-BOB, controlado a través de las tarjetas, se va a poder controlar la corriente que circula por los diodos láser y por tanto la potencia óptica que suministran, las conexiones realizadas se muestran la Figura 4.13 La asignación de los laser se ha hecho respecto a la colocación de las diferentes tarjetas, la DT9804 se ha colocado “delante” y la DT9802 “detrás” en baldas específicamente diseñadas para ellas.

Por tanto cuando hablemos de los láser no dirigiremos a ellos definiendo su posición respecto al DT al que van conectados (delante o atrás) y a su posición derecha o izquierda, esto mismo se puede aplicar para cada conjunto Driver-BOB de cada láser.

Láser	Frontal-Izquierda	Frontal-Derecha	Posterior-Izquierda	Posterior-Derecha
External Eneable	Salida digital 1 del DT9804	Salida digital 0 del DT 9804	Salida digital 1 del DT 9802	Salida digital 0 del DT9802
External Iset	Salida analógica 0 del DT 9804	Salida analógica 1 del DT 9804	Salida analógica 1 del DT 9802	Salida analógica 0 del DT 9802
I <sub>di</sub> (I diodo)	Entrada analógica 0 del DT 9804	Entrada analógica 3 del DT 9804	Entrada analógica 0 del DT 9802	Entrada del DT 9802 analógica 3
U <sub>di</sub> (U diodo)	Entrada analógica 1 del DT 9804	Entrada analógica 4 del DT 9804	Entrada analógica 1 del DT 9802	Entrada analógica 4 del DT 9802
I <sub>nd</sub> (I inductor)	Entrada analógica 2 del DT 9804	Entrada analógica 5 del DT 9804	Entrada analógica 2 del DT 9802	Entrada analógica 5 del DT 9802

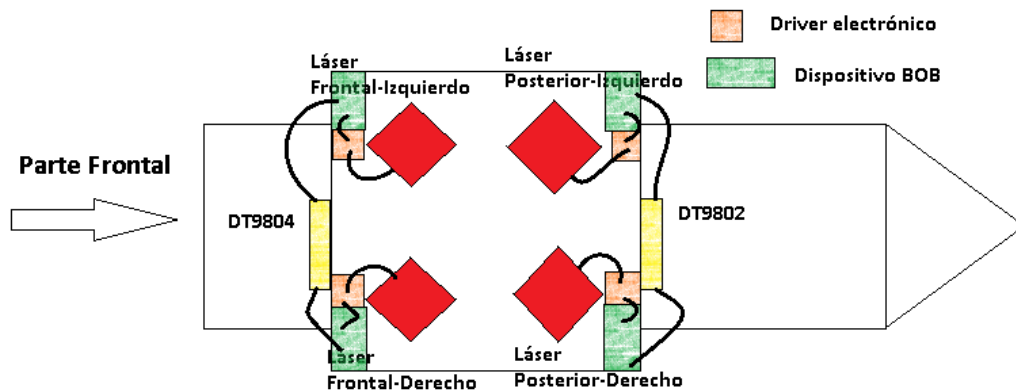


Figura 4.13- Conexiones realizadas entre las tarjetas y el dispositivo BOB y esquema explicativo de la disposición de los dispositivos láser y las conexiones realizados con estos.

#### - Láser de diodo

Para la excitación de la muestra se necesita una potente fuente óptica monocromática. Para conseguir una excitación homogénea se han utilizado 4 diodos láseres comerciales de alta potencia montados en formato cs-mount. Este formato es uno de los más simples y se pueden adquirir comercialmente.

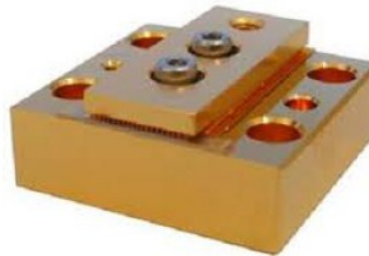
Dicho formato sólo incluye el propio diodo soldado a una estructura de cobre o de algún metal para favorecer la refrigeración del mismo. Los dispositivos elegidos son cuatro diodos laser de AlGaAs fabricado por la compañía COHERENT con el empaqueta descrito anteriormente, cs-mount.

La potencia óptica de salida máxima es de 20 W con una corriente máxima de 25 A, en la Figura 4.14 se muestran las características del diodo láser. La

longitud de onda de emisión del láser es de 808 nm con una profundidad de penetración en silicio cristalino de  $\sim 13 \mu\text{m}$ .

Los diodos láser se polarizan en directa y empiezan a emitir cuando se alcanza una circulación de 4 A, incrementando linealmente hasta el máximo de emisión. El fabricante garantiza un tiempo de emisión de más de 10.000 horas siempre que se cumplan las especificaciones de funcionamiento.

Empaquetamiento	CS-MOUNT
Potencia óptica de salida en continuo	20 W
Anchura de las barras	1 cm
Área de emisor	$150 \times 1 \mu\text{m}$
Número de emisores	19
Longitud de onda central	$808 \pm 3 \text{ nm}$
Anchura espectral	$< 3 \text{ nm}$
Pendiente de eficiencia	$> 0.9 \text{ W/A}$
Corriente umbral	$< 10 \text{ A}$
Corriente de operación	$< 32 \text{ A}$
Temperatura de funcionamiento	$+10\dots+40 \text{ }^\circ\text{C}$



**Figura 4.14.** - Características técnicas suministradas por el fabricante y empaquetado cs-mount en el que vienen montados los laser.

#### - Cámara CCD

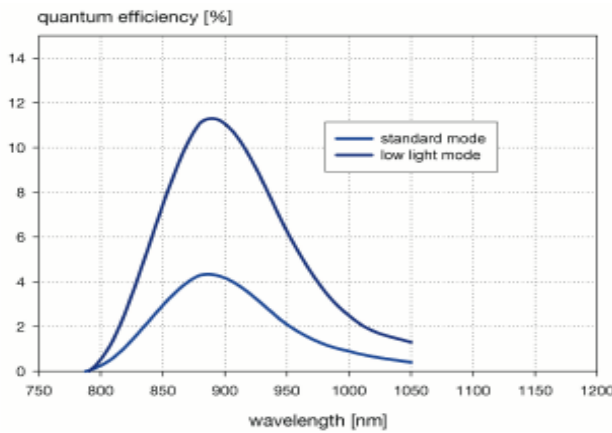
El sistema de captación de la imagen es el componente más importante del sistema. El sensor que utilice la cámara es el elemento diferenciador en la captura de luminiscencia. En el mercado existen dos tipos principales de cámaras para su uso en PLi; cámaras CCD (charge-coupled device) y cámaras con sensores de InGaAs.

- Los sensores CCD son los más baratos, el inconveniente es que tienen un rango espectral con eficiencia cuántica menor. Por contrapartida ofrecen resoluciones de imagen muy elevadas.
- Los sensores InGaAs son equipos caros, con un gran rango espectral y alta eficiencia cuántica, pero a diferencia de la CCD las resoluciones son menores.

En el equipo se ha utilizado una cámara con sensor CCD modelo 1300.solar del fabricante PCO. En la Figura 4.15 se muestran las principales características.



Resolución	Unidad	Punto de funcionamiento	Pco.1300 solar
Resolución	Pixel	Modo extendido	1424 x 1060
		Modo normal	1392 x 1040
Tamaño del pixel	µm	-	6.45 x 6.45
Eficiencia cuántica	%	@880 nm	13
Corriente de oscuridad	$e^-$ /pixel*seg	@10°C	0.05
Rango dinámico A/D	Bit	-	12
Ruido de lectura	$e^-$ rms	@10 / 20 Mhz	6/10
Factor de conversión	$e^-$ /cuenta	-	3.8/1.9
Alimentación	VDC	Típico	24 V (18...28 V)
Consumo	W	Máximo	20
Dimensiones	mm <sup>2</sup>	-	113 x 104 x 110
Peso	Kg	-	1.1
Temperatura de operación	°C	Rango	+10...+40
Humedad de operación	%	Rango	10...80



**Figura 4.15-** Principales características del dispositivo (arriba), eficiencia cuántica en función del modo de funcionamiento (abajo-izquierda) y aspecto físico de la cámara 1300.solar PCO (abajo-derecha) suministrados por el fabricante.

La comunicación con el ordenador de la cámara se realiza mediante Firewire. Este tipo de sensores depende en gran medida de la temperatura de funcionamiento por tanto habrá que ajustar a una temperatura de funcionamiento entorno a los 5°C...15°C, que es la temperatura más ventajosa según el fabricante.

Se ha utilizado como complemento de la cámara el objetivo HF12.5SA-1 del fabricante Fujinon como el de la Figura 4.15.

Distancia focal	12.5 mm
Rango de iris	F1.4-F22
Rango de enfoque	∞ ~ 0.1 m
Distancia focal trasera	16.07 mm
Peso	295 g



**Figura 4.15.-** Características del objeto acoplado a la cámara y aspecto físico del mismo.

- Sistema de control de temperatura de los láseres

Como sistema de seguridad adicional se ha incorporado un dispositivo de medida de la temperatura de los láseres. La finalidad de este sistema es evitar que los diodos laser alcancen temperaturas superiores al umbral de operación, poniendo en peligro la durabilidad de los diodos laser. Se ha optado por utilizar como sensores de temperatura termopares ya que son baratos en comparación con otros sensores de temperatura y bastante robustos, los termopares elegidos son de tipo K. Para la interpretación y el registro de los datos se ha optado por utilizar un datalogger de aplicación específica en registro de temperaturas. El dispositivo elegido es el TC-08 RS232 de la compañía PICO Technology. En la Figura 4.16 se muestran las características. La elección del tipo de termopares y el dispositivo datalogger se efectuado debido a la disponibilidad de dichos dispositivos y a su adecuación a las necesidades.

Número de canales	8
Precisión	$\pm 0.3 \%$ y $0.5^{\circ}\text{C}$
Protección de sobrecarga	$\pm 10 \text{ V}$
Impedancia de entrada	$2 \text{ M}\Omega$
Tipos de Termopares que soporta	B,E,J,K,N,R,S,T
Tiempo de conversión	200 ms para la compensación de junta fría y 200 ms por cada canal activo.
Conectores de entrada	8 x clavijas mini
Conectores de salida	Clavija D9 hembra
Dimensiones	85 x 145 x 25 mm
Alimentación	No es necesario
Temperatura de funcionamiento	de $0-50^{\circ}\text{C}$
Humedad de funcionamiento	de $0-95 \%$



Figura 4.16.- Características del datalogger utilizado TC-08 RS232 y el aspecto físico del mismo.

La unión de los termopares con los dispositivos láser se ha efectuado utilizando el mismo pegamento térmico utilizado en la unión entre los diodos láser y el sistema de refrigeración, el Artic Silver Termal Adhesive, del que ya se habló con anterioridad. Esta unión se efectúa en el montaje del diodo láser para evitar posibles daños. En la Figura 4.17 se puede observar dicha unión.



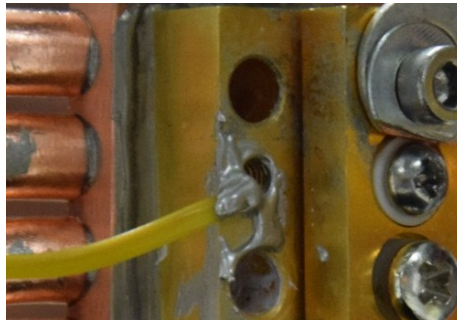


Figura 4.17.- Unión del termopar con la carcasa del láser utilizando pegamento térmico.

La configuración de la temperatura de alarma del sistema de control se ha elegido teniendo en consideración las temperaturas de funcionamiento óptimas y máximas proporcionadas por el fabricante por tanto la temperatura de alarma escogida es la máxima de funcionamiento, 40°C.

#### - Sistema de medida de la temperatura ambiente

La temperatura de trabajo es un factor bastante importante a la hora de efectuar medidas, ya que una temperatura muy elevada o muy baja puede falsear los resultados obtenidos e incluso en el caso de temperaturas ambiente muy elevadas impedir un buen funcionamiento de la refrigeración del sistema.

Para poder controlar la temperatura ambiente los ensayos se deberían efectuar en un recinto debidamente climatizado. Para poder comprobar por tanto efectuar algún tipo de corrección en las medidas o simplemente como dato adicional se ha incluido en el montaje un sistema que mide la temperatura ambiente a la altura de los láseres. El sensor consiste en una resistencia variable PT100 y un display. En la Figura 4.18 se puede apreciar el sistema de medida de temperatura ambiente ya instalado.



Figura 4.18. - Sistema de medida de la temperatura ambiente, señalado mediante un círculo amarillo el sensor.



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

## 5- Software del sistema

En este capítulo hablaremos sobre el software utilizado en la toma de medidas. Se utilizarán dos softwares diferentes, uno dedicado al control de la temperatura de los láseres (por tanto no intervendrá en las medidas de electroluminiscencia) y el utilizado para controlar la cámara CCD. El software de control de la cámara será el mismo para todas las medidas realizadas tanto de foto como de electroluminiscencia.

Los programas utilizados son:

- Para el control de la temperatura de los láseres se utilizará la última versión del software “PicoLog Recorder 5.23.0”, Figura 5.1.
- Para la manipulación de la cámara CCD se utilizará el software “CamWare 3.8.0.243”, Figura 5.1.



**Figura 5.1.-** Software utilizado para los ensayos, PicoLog Recorder (izquierda) y CamWare (derecha).

Ambos programas se ejecutarán y monitorizarán desde un mismo ordenador. Los programas utilizados han sido proporcionados por el fabricante.

### - Software del control de temperatura “PicoLog Recorder”

El reconocimiento del dispositivo dentro del entorno Windows 7 que es el utilizado para la realización de los ensayos se efectúa de forma automática una vez instalado el software. Una vez arrancado el software la pantalla de inicio que se muestra es la que aparece en la Figura 5.2.

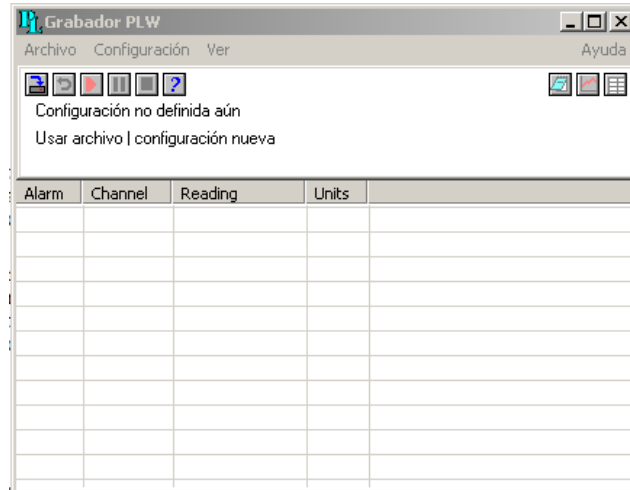


Figura 5.2.- Pantalla de inicio del software Pico Recorder.

Para la configuración de la medida de las temperaturas se tendrá que crear una configuración nueva desde el menú desplegable “*Archivo/Configuración nueva*” una vez dentro aparecerá la siguiente ventana, Figura 5.3. Los parámetros elegidos son los que se muestran en la figura. El método de muestreo es “*Tiempo real continuo*”, debido a la utilización posterior de alarmas. La acción al terminar la ejecución es “*Desplazarse*” que desplazará la gráfica a medida que supera el número máximo de muestras para tener una visión amplia de la variación de la temperatura durante el ensayo. El resto de los parámetros los dejaremos tal y como vienen por defecto y se pulsará “*Aceptar*”.

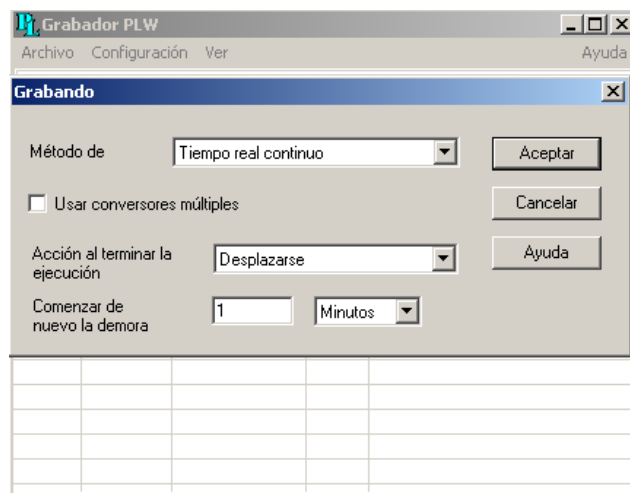


Figura 5.3.- Parámetros iniciales elegidos de la toma de temperaturas del software Pico Recorder.



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

En la siguiente ventana se establecerán los parámetros específicos del muestreo. De forma predeterminada el intervalo de muestreo es de 1 segundo. El intervalo de 1 segundo es bastante aceptable ya que no nos interesan cambios repentinos, sino sobrecargas del sistema. Se establecerá que se tome un máximo de 600 muestras, lo que equivale a 10 minutos de gráfica. El resto de los parámetros se dejarán tal y como vienen por defecto y se pulsará “Aceptar”.

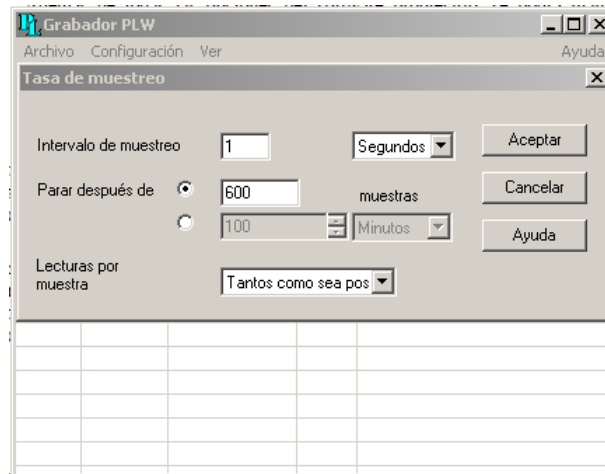


Figura 5.4.- Parámetros específicos de la tasa de muestreo.

En la siguiente ventana se elegirá el datalogger utilizado. En “tipo de” elegiremos el “TC-08 (serie)”, ya que el datalogger utilizado aunque se conecte mediante USB no es el modelo adaptado a ese tipo de protocolo y por tanto el software no lo reconoce. Para saber el puerto utilizado tendremos que hacer click derecho en “Equipo” y seleccionar “Administrar” una vez dentro iremos a “Herramientas del sistema/Administrador de dispositivos/Puertos (COM y LPT)” ahí veremos en qué puerto se encuentra el datalogger. En la Figura 5.5 se puede ver que en este caso se encuentra en el COM3.

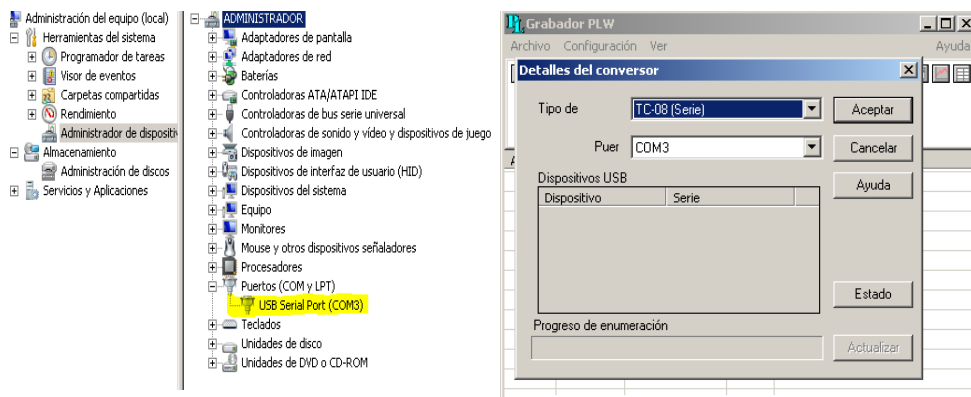
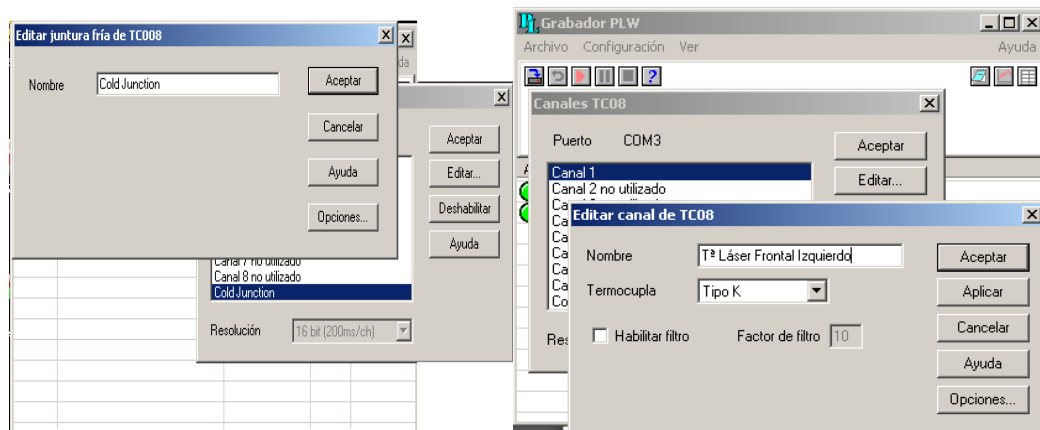


Figura 5.5.- Puerto utilizado por el datalogger subrayado en amarillo (izquierda). Elección del datalogger utilizado y el puerto de entrada correspondiente.

Una vez que se sabe el puerto en el que se encuentra el datalogger lo seleccionamos en el menú desplegable, Figura 5.5, y se pulsará “Aceptar”.

El programa tardará unos instantes en cargar el dispositivo y aparecerá una nueva ventana que corresponde a los propios canales del datalogger. Lo primero que hay que hacer es configurar la “juntura fría” canal interno del dispositivo utilizado para corregir los valores de los termopares. La configuración de este canal interno viene de forma predeterminada y lo único que habrá que hacer será activarla. Se selecciona y se pulsa “Editar...”. Aparecerá una nueva ventana, de forma predeterminada el nombre aparecerá en inglés “Cold Junction”, se puede dejar tal y como está y se pulsa “Aceptar”. En la Figura 5.6 se puede ver la edición de la juntura fría.



**Figura 5.6.-** Configuración de la juntura fría (derecha). Configuración de un termopar tipo K para la medida de temperatura (izquierda).

Una vez hecho esto se configurará los termopares. En esta explicación solo se mostrará el ejemplo de uno, para el resto de termopares el procedimiento es el mismo. Se seleccionará un canal no utilizado y se presionará en “Editar...”. Una vez dentro se cambiará el nombre de manera que se identifique al láser que va a controlar, “Tª Láser Frontal Izquierdo”. En el apartado “Termocupla” se elegirá del menú desplegable “Tipo K” que es el termopar utilizado para el control de la temperatura y se pulsará “Aceptar”. El resto de parámetros se dejarán tal y como están por defecto. En la Figura 5.6 se puede ver los parámetros finales.

El mismo procedimiento de configuración de los canales se efectuara para los otros tres termopares, denominando a cada uno su láser correspondiente. Una vez terminada la configuración se pulsara “Aceptar” en la ventana de elección de los canales y habremos terminado la configuración inicial del dispositivo.



A continuación y debido a que la medida de los termopares contiene cierto grado de error habrá que calibrarlos. Para ello se creará un parámetro calculado adicional que será la temperatura de referencia del láser. Al igual que en la configuración de los termopares en esta explicación solo se pondrá de ejemplo un canal, el resto se configurará de forma similar teniendo en cuenta el láser al que corresponde cada canal.

Para crear un canal adicional pulsaremos en el menú desplegable “Configuración/Parámetros calculados”. Aparecerá la pantalla que se puede ver en la Figura 5.7. Se pulsará “Agregar” y saldrá una nueva pantalla. Esta pantalla es la que aparece en la Figura 5.7 y desde ésta se podrá calcular la calibración de la temperatura. Realizando pruebas utilizando un sensor de temperatura calibrado se llegó al algoritmo “ $A * 0.58 * \left( \frac{0.85 + \text{Log}_{10}(A)}{\text{Log}_{10}(A)} \right)$ ” donde “A” es la temperatura que mide el termopar. Este algoritmo adapta muy bien la temperatura en el intervalo en que el que se va a manejar el láser, 10...60 °C

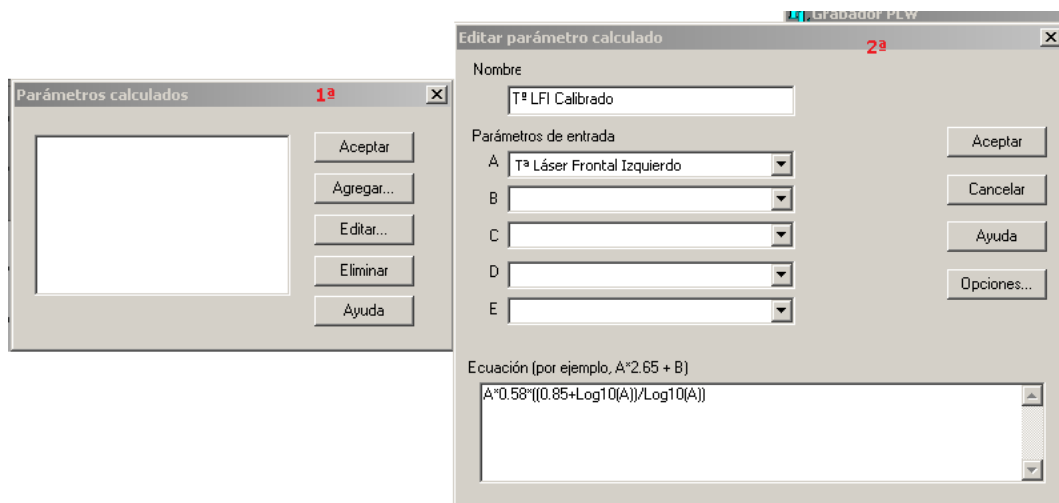
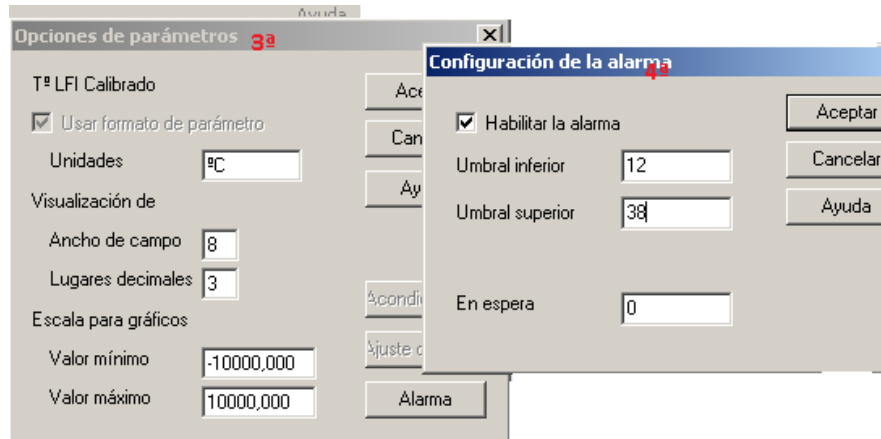


Figura 5.7.- En esta figura aparecen numeradas según aparición las ventanas para acceder al editor de parámetros calculados desde donde se calibran los termopares.

Una vez introducido el algoritmo necesario para la calibración de la temperatura. Se pulsará en “Opciones” y aparecerá una nueva ventana que se utilizará para seleccionar las unidades del parámetro calculado y configurar la alarma. En el apartado unidades se escribirá “°C” el resto de los parámetros se dejarán tal y como están por defecto. Se pulsará en “Alarma” para configurar la alarma del sistema. En esta nueva ventana se hará click en “Habilitar la alarma” se podrán los valores de “Umbral inferior” y “Umbral superior”. Debido a que el láser tiene unas temperaturas de trabajo de entre 10 °C y 40 °C se elegirán para el umbral inferior 12 °C y para el umbral inferior



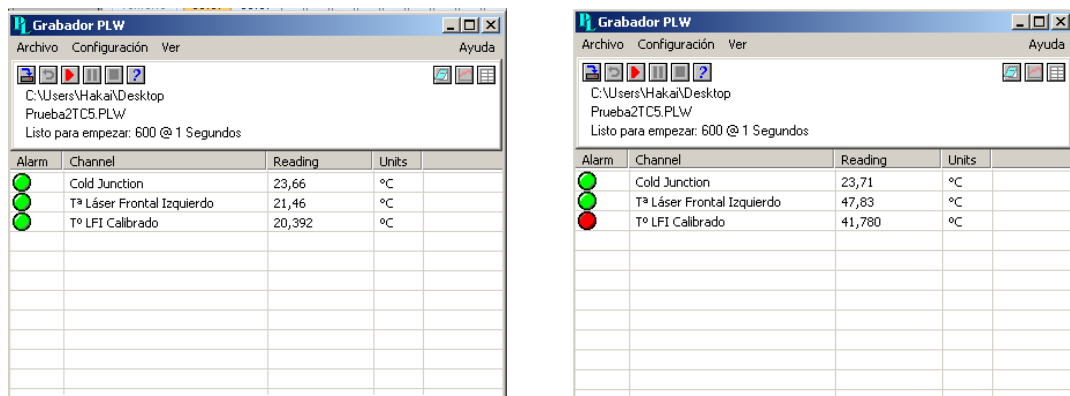
38 °C. El resto de los parámetros se dejarán tal y como están por defecto. Una vez hecho esto se pulsará “Aceptar” en todas las ventanas. Y la configuración habrá terminado. En la Figura 5.8 se pueden ver las ventanas utilizadas.



**Figura 5.8.-** En esta figura aparecen numeradas, siguiendo la numeración de la Figura 5.7, las ventanas utilizadas para configurar las unidades de temperatura de la Tª calibrada y la configuración de la alarma.

El procedimiento anterior para la configuración de la temperatura calibrada se repetirá para el resto de temperaturas.

Una vez efectuado lo anterior en nuestra ventana principal aparecerá lo que se puede observar en la Figura 5.9. Y si en algún momento la temperatura rebasa los umbrales establecidos el círculo verde se tornará rojo, Figura 5.9 y el programa emitirá un sonido para avisar. Este sonido y cambio de color permanecerá hasta que la temperatura vuelva a valores normales.



**Figura 5.9.-** Ventana inicial con la Tª de juntura fría, la Tª medida por el termopar y la Tª calibrada (izquierda). Activación de la alarma debido al rebosamiento superior de la Tª umbral de 38 °C. (derecha).



- Software de control de la cámara CCD “CamWare”

Para el procesado y adquisición de imágenes se utilizará el software “CamWare”. Dicho software no se ejecutará a no ser que detecte la cámara CCD conectada al ordenador. Una vez ejecutado el programa y la cámara encendida y conectada la ventana principal que aparece es la que se puede ver en la Figura 5.10.

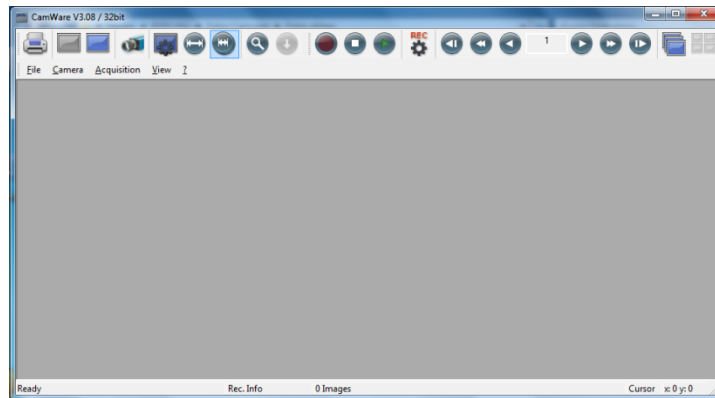


Figura 5.10.- Ventana principal del software “CamWare”

Para comenzar habrá que crear una pantalla para visualizar la imagen de la cámara. El programa tiene dos modalidades de visualización de imágenes; blanco y negro y color. Para los ensayos se utilizará la visualización en blanco y negro, ya que solamente se distinguirán zonas más oscuras o más claras dependiendo de los defectos. Pulsando en el botón “View B/W” o desde el menú desplegable “View/B/W Window” de la ventana principal aparecerá una ventana secundaria para la visualización de las capturas de la cámara tal y como se puede ver en la Figura 5.11.

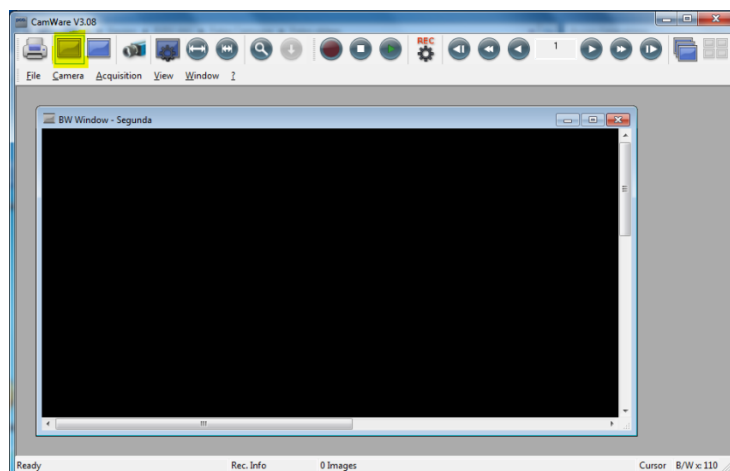


Figura 5.11.- Ventana de visualización en B/N de las capturas de la cámara, subrayado en amarillo el botón correspondiente a “View B/W”.



Existen dos tipos de parámetros que podemos modificar a la hora de la adquisición de imágenes, los parámetros propios de la cámara y los parámetros de edición de imagen. Para acceder a los parámetros propios de la cámara se pulsará sobre el botón “*Camera control*” o desde el menú desplegable “*Camera/Camera Control*”. Aparecerá una nueva ventana con 4 pestañas que corresponden a los parámetros que se pueden variar desde el software.

- “*Timing*”. Desde esta pestaña se puede modificar el tiempo de exposición de la cámara así como el modo de captura. Para los ensayos el modo de captura utilizado será de forma automática, “*Auto Sequence*”. En cuanto al tiempo de exposición será un parámetro modificable dependiendo de la luminiscencia, a menor luminiscencia mayor tiempo de exposición necesario.
- “*Sensor (Size)*”. Desde esta pestaña se puede modificar la región del sensor que queremos capture la imagen. También se podrá modificar el formato del sensor, entre “*standard*” y “*extended*” de los que se habló en la descripción de la cámara en el capítulo 4. Para los ensayos el formato del sensor será “*standard*” con el resto de parámetros tal y como están por defecto.
- “*Sensor (Misc.)*”. Desde esta pestaña se podrá variar la  $T^a$  de la cámara en “*Cooling Setpoint*”, lo que hará actuar o no al sistema de refrigeración interno de la misma. Como la temperatura óptima se encuentra entre 5 °C y 15 °C se configurará a 11 °C. Otro parámetro que habrá que configurar será la sensibilidad a los infrarrojos en “*IR Sensitivity*”, que tiene que estar activada. Los demás parámetros se dejarán por defecto tal y como aparecen en la Figura 5.12.
- “*Recording*”. Esta última pestaña corresponde a los parámetros de captura de imágenes. En esta pestaña todos los parámetros se dejarán por defecto tal y como aparecen en la Figura 5.12.

En la Figura 5.12 se pueden ver todas las pestañas de la ventana “*CameraControl*”, así como los parámetros utilizados.

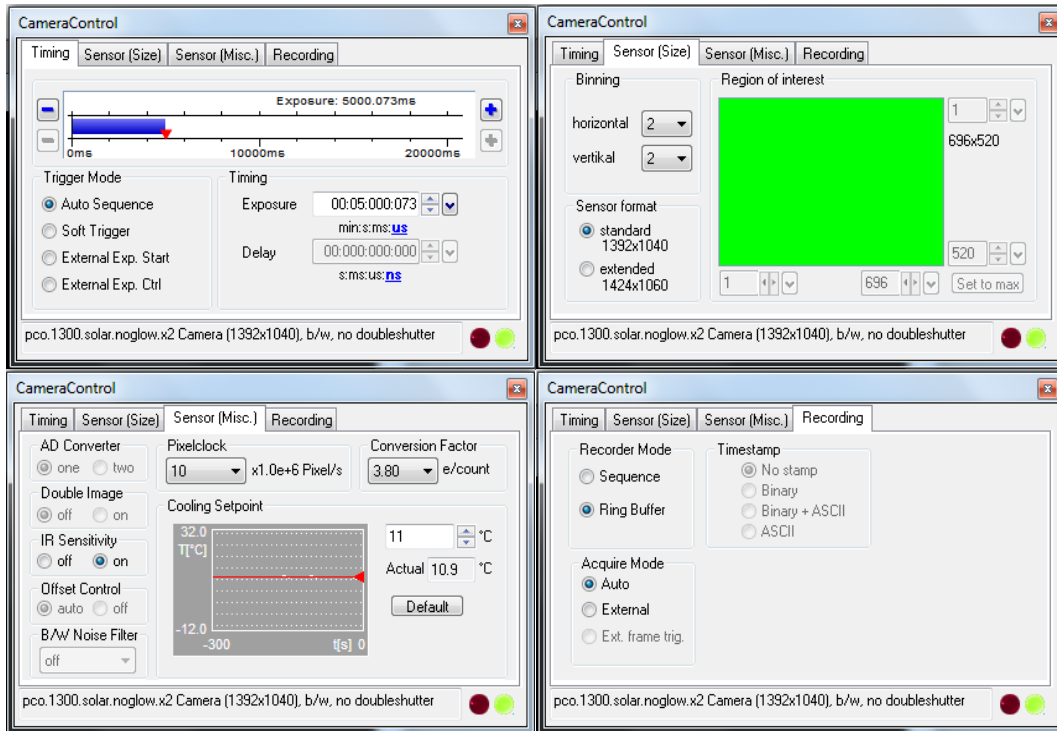


Figura 5.12.- Ventana de los parámetros de la cámara en “CameraControl”, con todas sus pestañas y los parámetros utilizados para la captura de imágenes.

Antes de ejecutar la adquisición de imágenes se pueden previsualizar los parámetros desde el botón “Live Preview” o desde el menú desplegable “Acquisition/Live Preview”. En la previsualización se verá la imagen con los parámetros elegido anteriormente y no se grabará ningún archivo de imagen ni ensayo. En la Figura 5.13 se puede ver la previsualización de una medida por fotoluminiscencia.

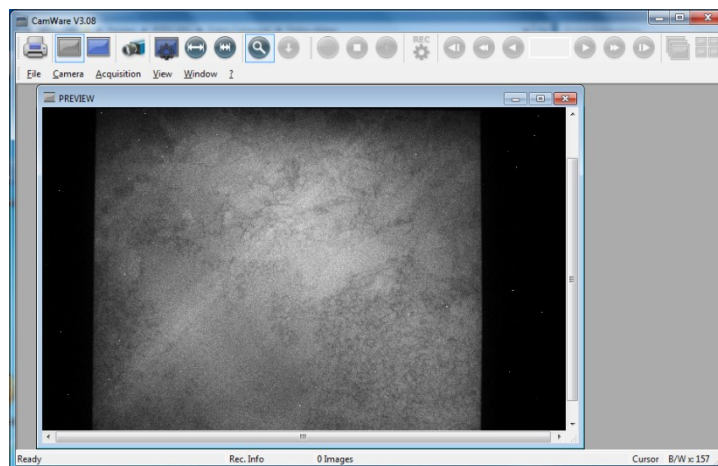


Figura 5.13.- Previsualización de un ensayo por fotoluminiscencia.

Pulsando el botón “Convert Control” o desde el menú desplegable “View/Convert Control BW” se puede acceder a la ventana de modificación de parámetros de la imagen. Con estos parámetros se consigue ajustar la imagen de manera que se pueda visualizar mejor para el análisis de defectos. La ventana consta de 3 pestañas en la parte superior y un histograma de intensidad en la parte inferior que muestra la cantidad de píxeles para cada valor de intensidad. Mediante el uso de dos líneas verdes se puede seleccionar un rango de valores de forma en la imagen solo se muestre ese rango seleccionado. Dentro del histograma también se podrá hacer zoom y cambiar los valores máximo y mínimo para una mejor visualización. En la Figura 5.14 se puede ver el histograma de la parte inferior.

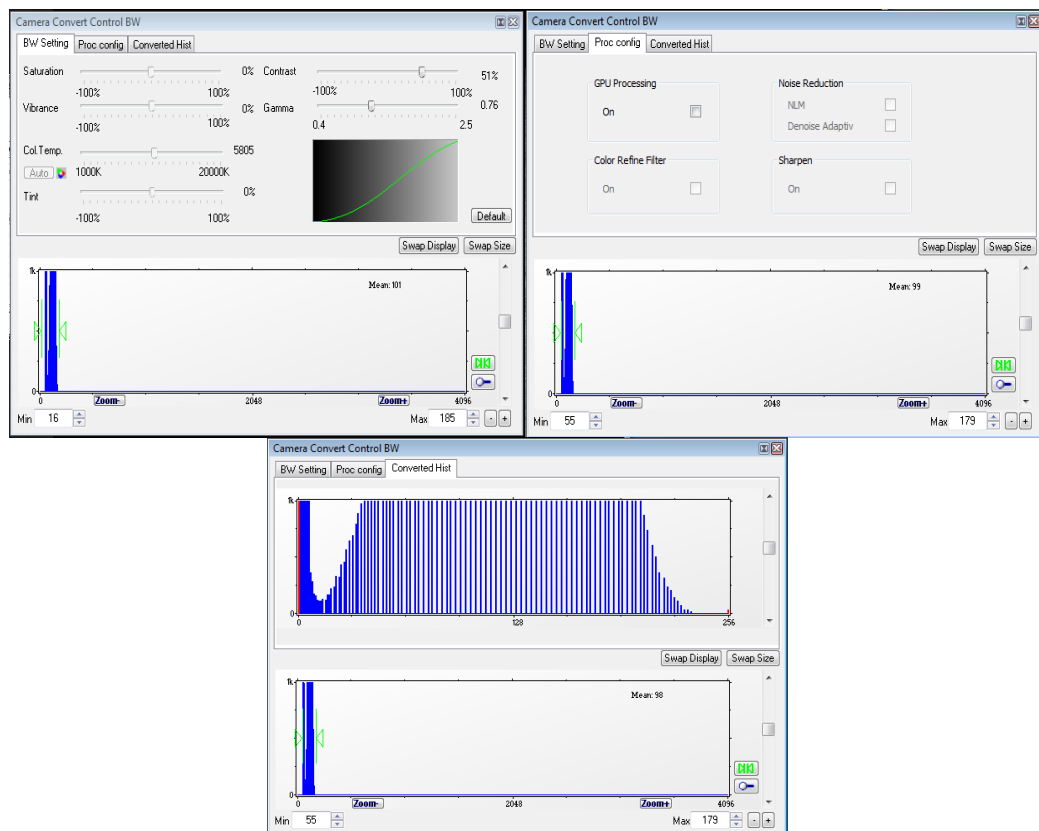
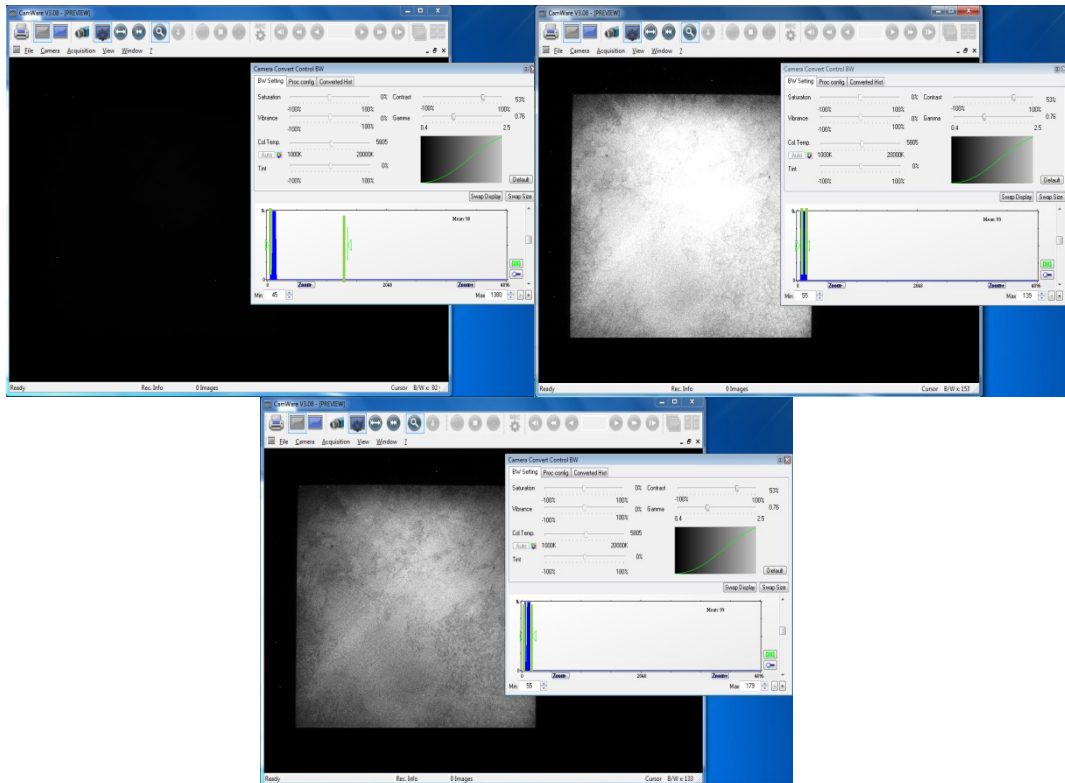


Figura 5.14.- Ventana de los parámetros de la imagen y las diferentes pestañas. En la parte inferior se puede ver el display con las barras verdes de selección del rango.

Desde los botones “Auto Range Peak” y “Auto Range Crop”, obligará en ambos casos a escalar la imagen a los valores máximo y mínimo de la intensidad de la imagen del histograma, pero en el caso del “Auto Range Crop” no tendrá en cuenta intensidades extremas (oscuridad o brillante como puntos de luz, reflexiones...). En la Figura 5.15 se pueden ver las diferencias entre ellas y el escalado manual.



**Figura 5.15.-** Imágenes del mismo ensayo con rangos de intensidad del histograma diferentes. Utilizando el “Auto Range Peak” con un rango muy amplio por lo que no se ve nada (arriba-izquierda,) “Auto Range Crop” con un rango muy pequeño por lo que aparece demasiado brillante (arriba-derecha) y ajustando de forma manual para que se vea de la forma más nítida posible (abajo).

Para efectuar una adquisición de imagen y poder así guardarla para posteriores análisis se abrirá una ventana en blanco y negro como se explicó antes y se pulsará el botón “Star Record”, desde el menú desplegable “Acquisition/Acquire Sequence” o simplemente pulsando “Intro”. El programa tardará dependiendo del tiempo de adquisición, en la Figura 5.16 se puede ver la adquisición de la imagen de una oblea de silicio policristalino y monocristalino al 50% cada uno.

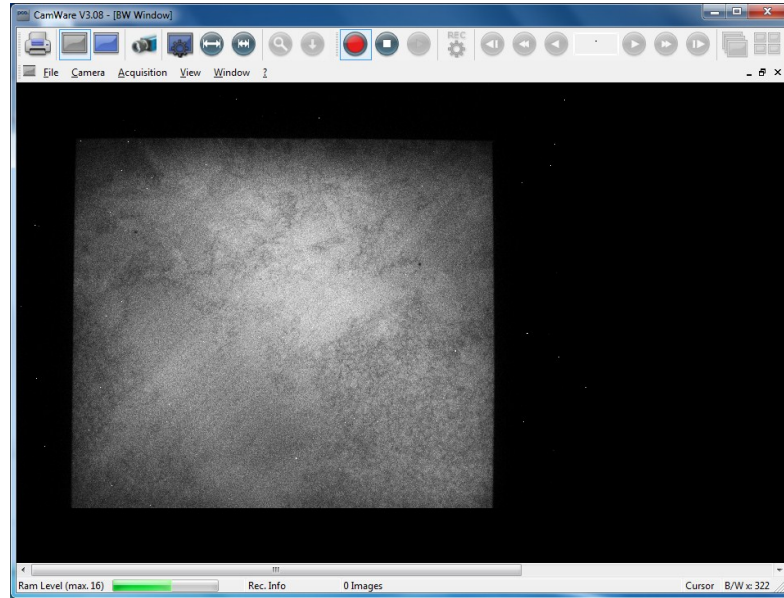
Una vez terminada se podrá guardar desde el menú desplegable “File/Save Raw Recorder Sequence” o simplemente mediante el comando “CTRL + S”. El archivo guardado tiene una extensión “.tif”. Para obtener solamente la imagen se utilizará el comando “CTRL + P” para imprimirlo mediante algún software de impresión virtual como por ejemplo “PDF Creator” el cual creará una imagen en PDF de la misma con los parámetros utilizados como la que aparece en la Figura 5.17.



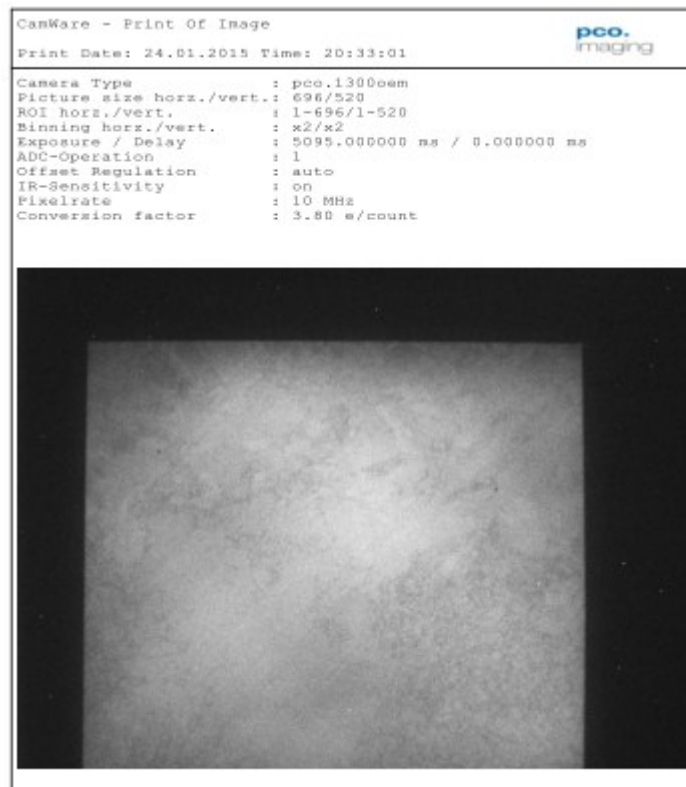


## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid



**Figura 5.16.-** Captura de la fotoluminiscencia emitida por una oblea de silicio. La parte de arriba es silicio policristalino y la parte de abajo es silicio monocristalino.



**Figura 5.17.-** Imagen del PDF creado a partir de la adquisición de la Figura 5.16. En la parte superior aparecen los parámetros utilizados.





## 6- Estructura y entorno de pruebas del sistema

La estructura del sistema es una de las partes más importantes, ya que es la encargada de proporcionar un entorno adecuado para la realización de las medidas. Este entorno ha de ser lo más hermético posible en cuanto a la entrada de luz exterior se refiere, ya que dicha luz podría interferir en la imágenes captadas por la cámara. Además la estructura cumple también una función de diseño de manera que facilite la realización de las medidas de forma que el cambio de célula no sea aparatoso. Otro aspecto importante de la estructura es la posibilidad de calibración; movilidad de los láseres, nivelación del sistema, son algunas de las características que mejorarían la precisión de la medida.

### - Base de la estructura

Por necesidades técnicas el sistema tiene una altura de 180 cm y un área en comparación muy pequeño, 27.5 x 29 cm, por lo que existe un problema de estabilidad. Este problema se ha solucionado mediante la incorporación de una base con un área lo suficientemente grande como para evitar dicha estabilidad.

El sistema entero se encuentra apoyado en una base realizada a partir de una lámina cuadrada de acero de 5 mm de grosor con unas dimensiones de 52 x 57 cm. Para la sujeción con la estructura se desarrolló un sistema de apoyo. Dicho sistema consiste en la utilización de pares de tubos estructurales cuadrangulares concéntricos, el tubo macho se encuentra soldado en la base de forma que el eje vertical de la estructura coincida con el centro de la base rectangular y los tubos hembra soldados en las esquinas inferiores del armazón. De esta manera facilitamos el transporte del sistema haciendo que la base sea desmontable. En la Figura 6.1 se pueden apreciar los tubos soldados a la base.

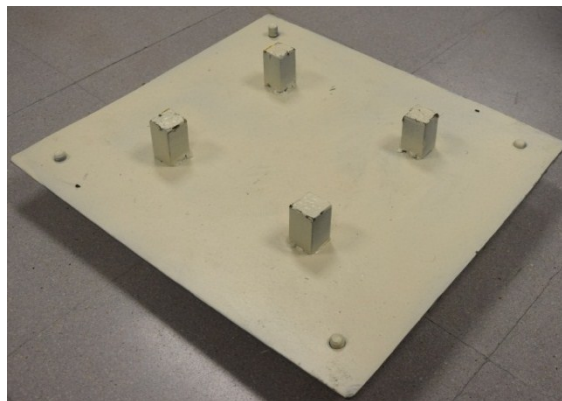


Figura 6.1.- Disposición de los tubos que forman el sistema de sujeción.



Otro aspecto deseable en nuestra base es la capacidad de adaptarse a una superficie que no esté perfectamente nivelada o simplemente facilitar la calibración de sistema de medida. Para conseguir este objetivo la base se apoya sobre la cabeza de un sistema de cuatro tornillos de 15 mm de diámetro situados en las esquinas de la base de manera que utilizando la llave de boca fija correspondiente se pueda ajustar a la altura deseada dentro de unos márgenes. Para realizar el roscado se soldó una tuerca por cada tornillo una por la parte inferior de la plancha de acero. En la Figura 6.2 se puede apreciar el resultado final del sistema de calibración.



**Figura 6.2-** Detalle del sistema de calibración y apoyo mediante tornillos de la base.

#### - **Armazón de la estructura**

El armazón de la estructura es la parte más visible del sistema y el encargado de proporcionar la hermeticidad lumínica que tanto nos interesa a la hora de realizar medidas, por tanto tendrá que cubrir la totalidad del sistema. Como el sistema de medida está planteado para realizar tanto medida en transmisión como en reflexión el armazón se realizó de dos piezas desmontables para facilitar tanto su fabricación como su posterior transporte.

#### - **Armazón del sistema de medida por transmisión**

En el sistema de medida por transmisión la captación de la luminiscencia se realiza por la parte en la que no inciden los haces de láser, por lo que la cámara CCD se situará en la parte inferior de la estructura. Por lo tanto para esta parte de la estructura se ha optado por realizarla en forma de prisma.

Para conseguir esto se ha utilizado como esqueleto base del armazón un perfil en ángulo metálico agujereado como el utilizado en la construcción de armarios metálicos de baldas para darle la forma básica a la estructura con el fin de facilitar la soldadura posterior de las planchas de acero. Se eligió este sistema por ser barato y por su sencillez. En la Figura 6.3 se puede apreciar la

forma básica del esqueleto, así como su disposición. La unión entre las diferentes piezas del esqueleto se realizó mediante tornillos y tuercas para facilitar el montaje.



**Figura 6.3.-** Esqueleto metálico del armazón (derecha) y armazón terminado (izquierda)

Para la construcción del armazón se utilizó plancha de acero de 1 mm, para aislar la luz del interior. Se utilizó acero para mejorar la resistencia estructural a posibles deformaciones por el peso. Las medidas del armazón son 275 x 290 x 1500 mm, en la Figura 6.3 se puede apreciar la forma final de la estructura para la toma de medidas en transmisión. Todo el interior del armazón se pintó de negro para evitar posibles reflejos.

En la parte inferior se dispuso de una puerta de dimensiones 190 x 380 mm para poder acceder a la colocación de la cámara CCD así como su manipulación interna. En todo el contorno de la puerta se colocó una junta autoadhesiva para impedir que una vez cerrada penetrase la luz, haciendo un sellado hermético. El cierre se efectuó soldando una pletina metálica a media altura de la puerta y colocando un sistema de cierre por palanca ajustable al lado izquierdo un con el mismo vástago, un agarre fijo al lado derecho para



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

efectuar un cerramiento perfecto. En la Figura 6.4 se puede apreciar el acabado final de la puerta.



**Figura 6.4.-** Detalle de la puerta del armazón para la captación por transmisión, así como del sistema de cierre.

- Armazón del sistema de medida por reflexión

En el sistema de medida por reflexión la captación de la luminiscencia se realiza por la parte en la que inciden los haces de láser. Por razones evidentes no se puede colocar la cámara en frente de las células porque taparía los dispositivos láser. Por tanto la cámara se ha colocado en un ángulo de  $50^\circ$  respecto a la célula de manera que se evitan las reflexiones de los láseres y se consigue una captación adecuada.

Para conseguir esto se ha utilizado como esqueleto base del armazón un tubo estructural cuadrangular para conferirle una mayor resistencia estructural que el ángulo metálico utilizado en el armazón del sistema por transmisión. En la Figura 6.5 se puede apreciar la estructura básica del esqueleto.



**Figura 6.5-** Esqueleto del armazón para la disposición de captación por reflexión.



Para la construcción del armazón se utilizó plancha de acero de 1 mm, para aislar la luz del interior. Se utilizó acero por los mismos motivos que en el sistema en transmisión. Las medidas del armazón son para los rectángulos que forman la parte superior e inferior 260 x 455 cm y para los romboides que forman las partes derecha e izquierda una base de 455 cm y una altura de 24 cm. La parte exterior se remató en pirámide para facilitar la incorporación de la cama CCD en el interior. En la Figura 6.6 se puede apreciar la forma final del armazón. Para efectuar la sujeción con el resto del sistema se soldó una pletina de acero con forma de “L” a la estructura del armazón de captación, en el que se había dejado un hueco de 210 x 300 mm a una altura de 700 mm de la base y se dispuso en la parte inferior de un cierre por palanca ajustable, en la Figura 6.6 se observa el resultado final y las juntas utilizadas para impedir la entrada de luz una vez fijado el armazón. Todo el interior del armazón ha sido pintado de negro evitar posibles reflejos.



**Figura 6.6.** Armazón terminado para el sistema de captación por reflexión (derecha), puerta para el acceso a la cámara del sistema de captación por reflexión (arriba), detalle del vástago del cierre de la puerta (abajo) y sistema de sujeción del armazón de reflexión (izquierda).

En la parte derecha se dispuso una puerta para poder acceder a la cámara CCD y poder manipularla sin tener que sacarla y para poder acceder al sistema de calibrado del ángulo de la cámara. La puerta tiene forma de trapecio rectángulo con base inferior de 445 mm base superior de 210 mm y una altura de 235 mm. Se eligió esta forma para poder aprovechar más todo el espacio. Al tener una forma tan poco usual, se optó por incorporar dos cierres para mayor agarre, uno utilizando un cierre de palanca y otro mediante un vástago con un agarre soldado en la estructura vertical. En la Figura 6.6 se



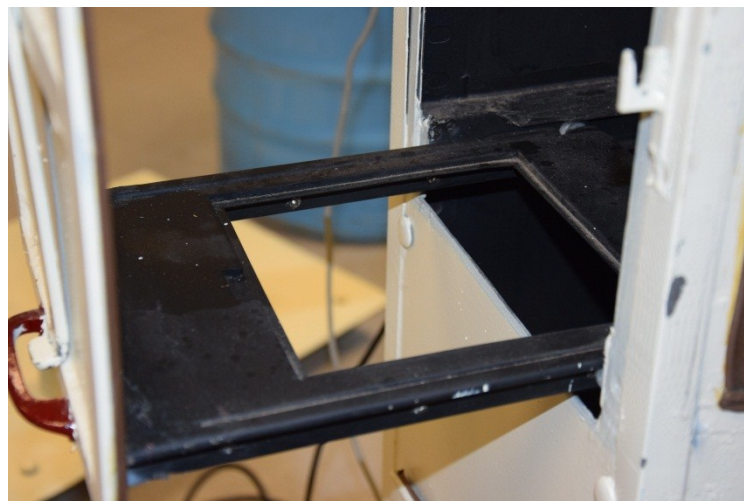
puede ver en detalle la forma del cierre por vástago. Alrededor de toda la puerta se dispusieron juntas para evitar la entrada de luz.

#### - Soporte de las muestras

El sistema de soporte de las obleas y las células es una parte importante a la hora de agilizar medidas consecutivas, ya que la forma en la que se cambie de una muestra a otra es crucial. Por este motivo en el diseño del sistema se ha tenido en cuenta que el cambio de una muestra a otra sea rápido y fácil.

Otro aspecto a tener en cuenta es que se dispone de dos formas de captación de la imagen. Una de las imágenes se tomará por la parte superior de la oblea y la otra por la parte inferior por lo que el soporte ha de ser hueco de forma que permita ambas formas de captación sobre el mismo apoyo.

Para solucionar estos problemas se ha dispuesto una plataforma hueca en el centro, con unos rebordes para poder apoyar las células. Dicho hueco tiene unas medidas de 150 x 150 mm por lo que situando un vidrio de dichas medidas en el hueco se podrían mediar obleas y células de medidas menores. En la Figura 6.7 se puede visualizar la estructura de la plataforma.



**Figura 6.7.-** Detalle de la plataforma apoyo de las células con la abertura para su colocación y el sistema de guías.

Para facilitar su apertura y cierre la plataforma esta atornillada a un sistema de guías y soldada a la propia puerta, formando puerta y plataforma un solo elemento. La instalación de la plataforma se ha efectuado a 700 mm desde la base, coincidiendo con la parte inferior de la abertura para el sistema de captación por reflexión. Tanto la puerta como la plataforma han sido selladas



mediante juntas para evitar tanto que la luz entre desde fuera como para evitar que el láser incida directamente en la cámara CCD. En la Figura 6.8 se puede apreciar con más detalle el dispositivo de apoyo de las obleas.



**Figura 6.8.-** Conjunto plataforma-puerta en el que consiste el sistema de apoyo de las células y las obleas.

Todos las partes interiores del sistema de apoyo están pintadas de negro para evitar posibles reflejos.

#### - Soporte de las fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación son elementos pesado dentro del sistema, por lo que para su colocación se ha de proveer un soporte lo suficientemente resistente para que aguante el peso. Por ello hemos utilizado la carcasa de una fuente de alimentación variable de mayor tamaño debido a disponibilidad técnica y a que se adaptaba perfectamente a nuestras necesidades.

La colocación del soporte se ha elegido siguiendo las siguientes pautas; que las extensiones de los cables de alimentación de los dispositivos no fuesen exageradamente largo, para evitar pérdidas y uso innecesario de recursos y comodidad a la hora de la instalación y manipulación de las mismas. El soporte se encuentra a una altura 1180 mm desde la base en la parte frontal del sistema. En la Figura 6.9 se puede apreciar la colocación del soporte y la distribución de las fuentes en la misma. Se ha aprovechado a colocar una fuente de alimentación a cada lado y dejar el espacio en medio para la colocación del cableado.





**Figura 6.9.-** En esta figura apreciamos el soporte donde van situados las fuentes de alimentación y la distribución de las mismas.

#### - Soporte de los láseres

La capacidad de variar la posición de los láseres es un aspecto importante, ya que permitirá una buena calibración y la realización de ensayos con diferentes condiciones. Esta parte es importante, ya que antes de poder conseguir una iluminación totalmente homogénea serán necesarias varias calibraciones.

Por ende, el soporte de los láseres es la parte más compleja mecánicamente hablando de todo el sistema. Las posibles variaciones que se requieren para una calibración total serán; la posibilidad de desplazar el láser independientemente de los demás en las tres dimensiones del espacio, pero con mayor importancia en el plano horizontal al suelo, para poder ajustar la posición de iluminación respecto a la oblea, la posibilidad de desplazar el láser en el eje perpendicular al suelo lo que permite un mejor acceso y manipulación de los láseres y la posibilidad bastante interesante de poder variar el alabeo de los láseres, permitiendo concentrar la luz de todos ellos o difuminarla más, a la vez que aumenta el grado de calibración del instrumento.

#### - Cuerpo del sistema

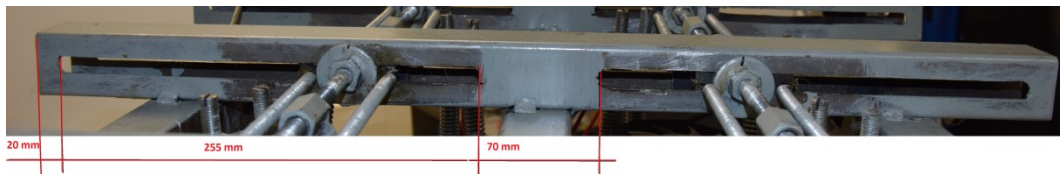
Para poder soportar todo el peso del sistema y a su vez servir de estructura sobre la que crear los dispositivos de movimiento de los soportes se creó mediante 6 tubos estructurales rectangulares de acero de sección 35 x 35 mm y de 610 mm de largo una cuadrícula con 4 espacios, uno para cada

láser. Estos espacios tenían unas medidas de 300 x 300 mm para que los láseres tuvieran mucha capacidad de movimiento en el plano horizontal. Pero después de varias pruebas se comprobó que la distancia entre los extremos de los tornillos sin fin era demasiado larga lo que provocaba un juego demasiado grande y en ocasiones el atasco del sistema. Por tanto se optó a desoldar el sistema y reducir ese espacio a 180 x 180 mm. Estas dimensiones ya no permitían tanto desplazamiento como la anterior disposición, pero sí que permitían el desplazamiento suficiente para cubrir todo el sector correspondiente de célula y bastante espacio para la manipulación. Con esta nueva disposición se reducen drásticamente los problemas de juego y sobre todo de atascamiento del sistema. En la Figura 6.10 se pueden observar las dos disposiciones que se manejaron.



**Figura 6.10.-** Disposición con espacios de 180 x 180 mm (izquierda) y disposición con espacios de 300 x 300 mm (derecha).

En los laterales de los tubos estructurales a media altura se mecanizó mediante una fresa un espacio de 10 mm de anchura por donde discurrirían los tornillos sin fin de manera que al mover en un eje, el otro se desplazase perpendicularmente a este. En la Figura 6.11 se pueden ver las medidas del espacio mecanizado y el resultado final una vez montado.



**Figura 6.11.-** Detalle y medidas de los espacios en los tubos estructurales por donde discurren los ejes del sistema del soporte de los láseres.



- Sistema de desplazamiento horizontal

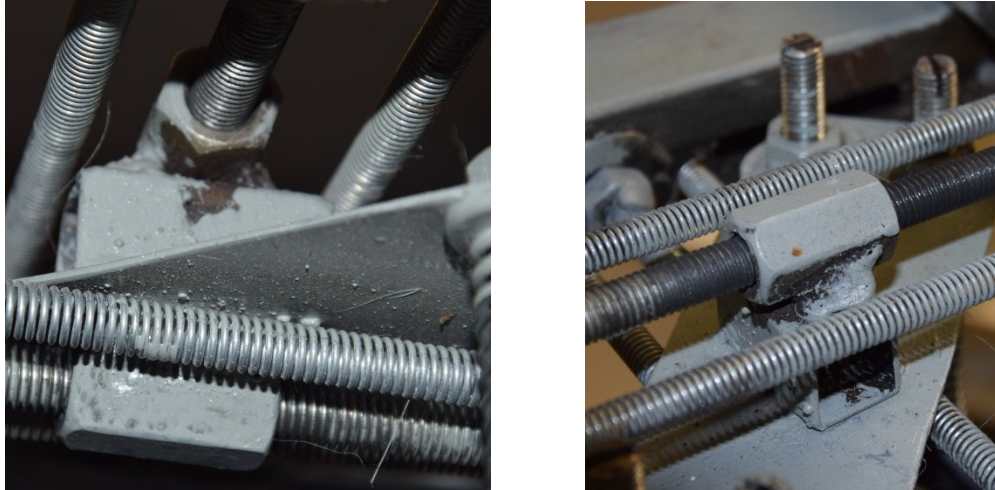
Para obtener el movimiento en el plano horizontal se diseñó un sistema basado en 2 varillas roscadas de 10 mm de diámetro y 300 mm de largo para cada láser. El diámetro se eligió para que fuesen lo suficientemente resistentes para aguantar el todo el peso del láser más el sistema de refrigeración del mismo. Las varillas se dispusieron en forma de cruz de tal manera que fuesen los ejes del plano por el que se mueven los láseres. En la Figura 6.12 se ve la colocación de dichas varillas que se efectúa en cada uno de los 4 espacios reservados para los láseres.



**Figura 6.12.-** Detalle de la colocación de las varillas roscadas formando un eje de cuadratura.

Para poder desplazar el soporte horizontalmente de manera que un eje se desplace respecto al otro se utilizaron tuercas de unión de varillas roscadas ya que estas tuercas son bastante alargadas y ofrecen una buena superficie para poder soldar sobre ellas. Las tuercas se dispusieron de forma perpendicular, siguiendo cada una su eje correspondiente. Debido a la distancia entre ejes las tuercas no se pudieron soldar la una a la otra y se soldó tubo estructural de 10 x 10 mm como nexo entre ellas. Entre el tubo y la tuerca inferior se soldó una chapa de 170 x 65 mm de acero de 1 mm de grosor que serviría para el posterior anclaje del soporte en sí. A esta chapa se le mecanizaron en la esquinas orificios de 10 mm de diámetro para el posterior sistema de desplazamiento vertical. Este sistema se utilizó en los

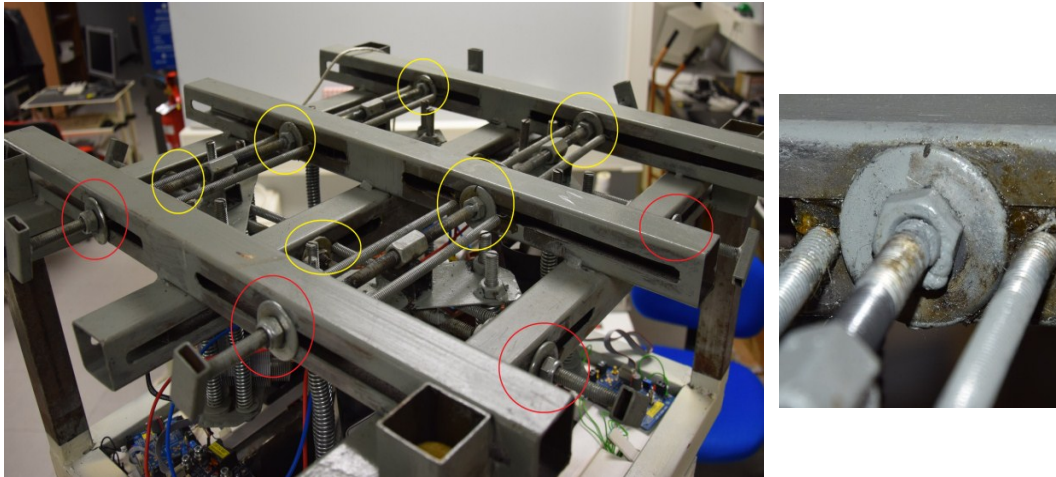
cuatros láseres, por lo tanto se hicieron 4 sistemas como este. En la Figura 6.13 se puede apreciar el aspecto final del dispositivo. Se eligió este sistema porque se adaptaba perfectamente a las necesidades de movilidad en el plano horizontal al suelo, era relativamente sencillo de construir y además era robusto.



**Figura 6.13.-** Dispositivo de tuercas que permite el movimiento de un eje respecto al otro visto desde la parte inferior (izquierda) y el mismo dispositivo visto de la parte superior (derecha).

Para reducir el juego vertical y horizontal del sistema se introdujeron en el interior de los tubos estructurales y atravesados por los tornillos sin fin pletinas de 35 mm de altura por 60 mm de largura. Este sistema permite que el juego vertical se vea reducido y además sirve de guía interior al sistema evitando roces con el interior y facilitando el desplazamiento. Para fijar este sistema de pletinas se utilizaron tuercas autorroscantes para permitir alguna posible reparación en caso de ser necesaria. Por la parte exterior del tubo se utilizaron arandelas de 10 mm de diámetro interior y de 40 mm de diámetro exterior para mantener los ejes perpendiculares entre sí. Estas arandelas están introducidas en el tornillo sin fin y se mantienen locas para reducir la fricción y están sujetas mediante tuercas soldadas al eje. En la Figura 6.14 se puede apreciar con detalle el dispositivo de arandela-tuerca y la colocación de algunos de estos en el sistema. Para fijar la posición horizontal se dispusieron tal y como se puede ver en la Figura 6.14 de arandelas y tuercas autorroscantes. Esto permite que la posición quede totalmente fija y no se pueda variar.





**Figura 6.14.-** Posición de algunos de los dispositivos arandela-tornillo en el sistema de posicionamiento horizontal, en amarillo y posición de los dispositivos de fijación de la posición horizontal, en rojo (izquierda) y detalle de un dispositivo arandela-tuerca (izquierda).

En total se utilizaron 24 grupos arandela-tuerca, 3 por cada eje en cada láser, lo que supone 6 por láser, en todas las caras exteriores del tubo estructural que forma el cuerpo.

Aun tomando las medidas anteriores como la pletina en el interior del tubo y los dispositivos arandela-tuerca el dispositivo se atascaba en algunas ocasiones o le costaba mucho avanzar. Para solucionar este problema se utilizó un sistema de muelles de tal manera que mantuviesen la pletinas interiores lo más horizontales posibles a la pared interior del tubo para mejorar el desplazamiento del soporte sin que éste se atascase o se torciese.

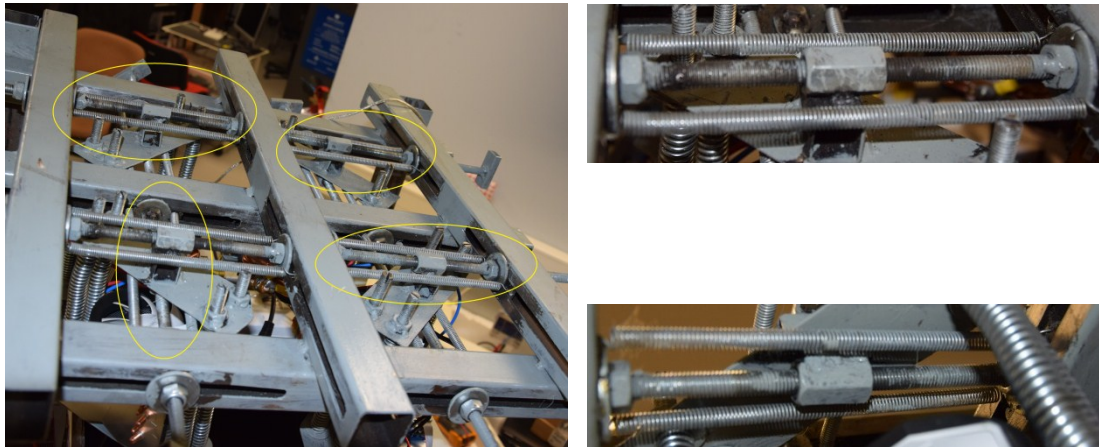
El sistema consiste en dos pares de muelles por eje, los cuales se encuentran pegados en sus extremos cada uno a un lado de la pletina interior, a la que se le hicieron muescas para que se agarrasen mejor. De esta manera cuando la pletina tiende a girarse hacia un lado, el muelle de ese lado se contrae por lo que ejerce menos fuerza y el del otro lado se estira por lo que ejerce más fuerza. Debido a esto aparece una fuerza que tiende a mover a la pletina a su estado original eliminando el atascamiento.

Para ello se utilizaron 16 muelles de 120 mm de longitud, 4 por cada laser. Para mejorar la sujeción a las pletinas la última vuelta del muelle se utilizó, después de doblarla un poco, a modo de gancho, para que encajase en las muescas realizadas en las pletinas interiores.

Una vez probado el sistema los resultados fueron muy buenos y se eliminó totalmente los problemas de atascamiento. En la Figura 6.15 se puede

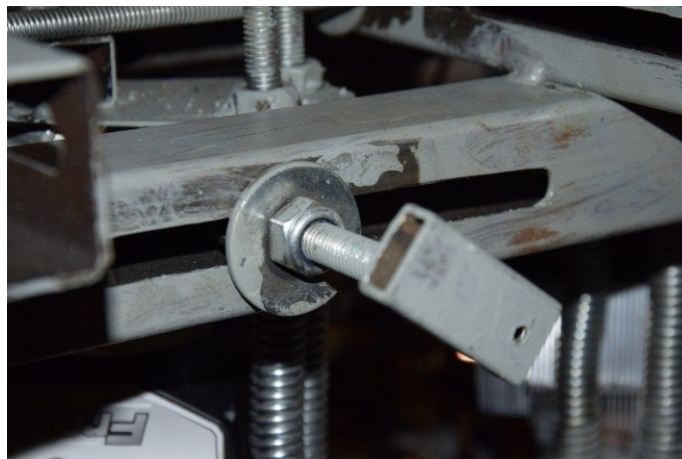


apreciar la disposición de los muelles y el detalle de la colocación de uno de ellos.



**Figura 6.15.-** Disposición de algunos de los muelles, tanto por la parte superior como la inferior (izquierda). Detalle de los muelles superiores (arriba a la derecha) y detalle de los muelles inferiores (abajo a la derecha).

Para una mejor manipulación del desplazamiento horizontal se soldó en el extremo de cada eje un mango formado por un tubo estructural rectangular de 5 x 20 x 45 mm. De esta forma no se hace necesaria la utilización de ninguna herramienta para el desplazamiento del láser de forma horizontal y los movimientos pueden ser más precisos. En la Figura 6.16 se puede observar el detalle de uno de los mangos.



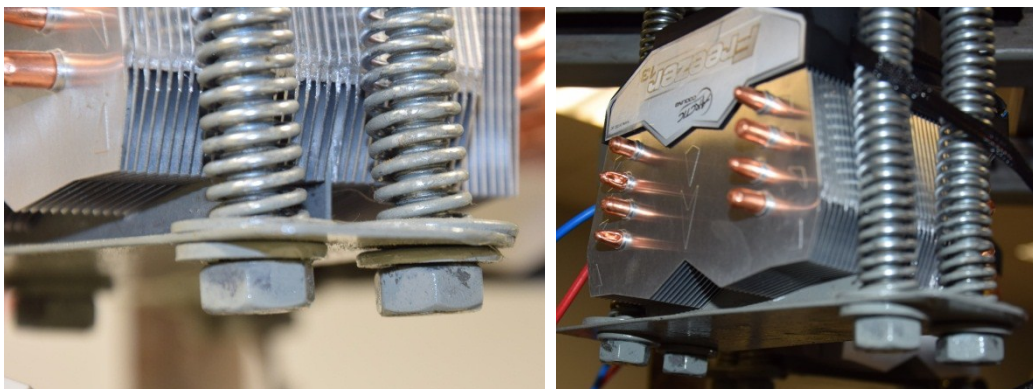
**Figura 6.16.-** Detalle de los mangos utilizados para el movimiento horizontal de los láseres.

- Sistema de desplazamiento vertical y alabeo

El desplazamiento horizontal conseguido con el sistema anterior permite una buena calibración del sistema así como un buen acceso a la manipulación de los láseres. Pero debido a la necesidad de una mejor capacidad de calibración, mayor variedad de configuraciones y de un acceso más amplio a la hora de la instalación de los láseres se optó por dotar al sistema de la capacidad de desplazamiento vertical y en consecuencia de una variación de su alabeo.

Para ello se utilizó un sistema basado en tornillos sin fin que funcionarían al mismo tiempo como sujeción del apoyo de los láseres al sistema creado mediante tuercas descrito anteriormente para el desplazamiento de un eje respecto del otro.

El sistema por cada dispositivo de sujeción de los láseres consiste en 4 varillas roscadas de 10 mm de diámetro y 200 mm de largo, del mismo tipo que las utilizadas en el desplazamiento horizontal. En las cuales se ha soldado en la parte inferior una tuerca y se han dispuesto de arandelas de 10 mm de diámetro interior y 25 de diámetro exterior a ambos lados del dispositivo de apoyo de los láseres, en la Figura 6.17 se pueden apreciar la colocación de las arandelas. En la parte superior se ha efectuado una muesca de manera que pueda introducirse un destornillador de punta plana. Para conseguir un roscado por el cual roscar la varilla se soldó una tuerca de 10 mm en la parte superior de la chapa que esta soldada en el sistema creado mediante tuercas para el desplazamiento de un eje respecto del otro. Los cuatro dispositivos de tornillos sin fin están colocado cada uno en una esquina de sus respectivas chapas tal y como se muestra en la Figura 6.17. En dicha figura también se puede apreciar el resultado del sistema una vez terminado.



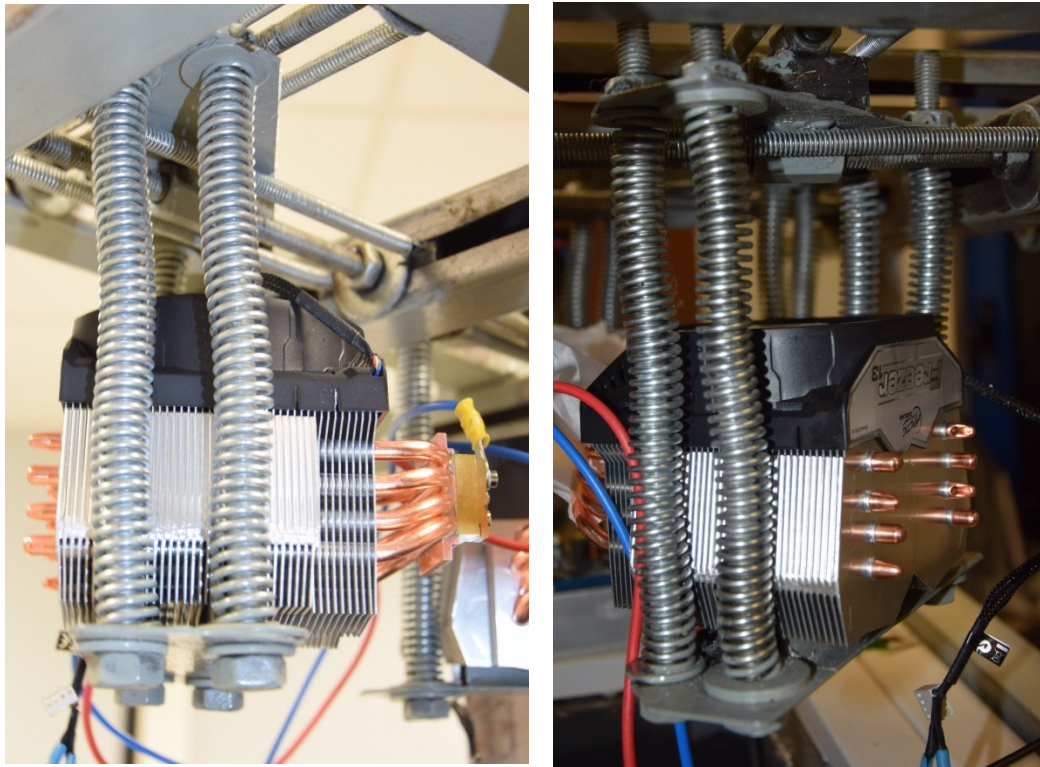
**Figura 6.17.-** Colocación de las arandelas en la base que sirve de apoyo al laser (izquierda). Disposición de las varillas roscadas respecto a la base de apoyo de los láseres (derecha).



Una vez creado este sistema se comprobó que el sistema fallaba debido a que el peso del láser y el disipador no era suficiente como para que alabease ni se desplazase verticalmente. Esto era debido a que las propias roscas impedían que la base-sujeción de los láseres se inclinase de alguno de los lados.

Para solucionar este problema se decidió utilizar muelles de compresión a modo de amortiguador. Estos muelles rodearían las varillas roscadas y ejercerían fuerza sobre la base sobre la que se apoyan el láser. Se usarían en las cuatro varillas roscadas que forman los tornillos sin fin del sistema.

Se usaron muelles de compresión de 200 mm de longitud y 15 mm de diámetro. Se introdujeron entre las dos chapas que forman el conjunto del dispositivo de desplazamiento vertical y la base de sujeción de los láser, tal y como se puede apreciar en la Figura 6.18. Además se incluyó una arandela en la parte superior del muelle para evitar el roce con la chapa.



**Figura 6.18.-** Muelles de compresión utilizados para solucionar el problema con el sistema de movimiento vertical y alabeo.

De este modo los muelles ejercen una fuerza considerable de forma independiente unos de otros por lo que cuando uno de los tornillos sin fin



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

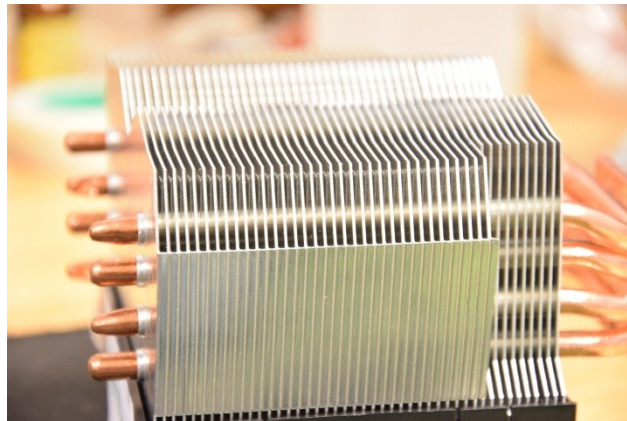
Universidad de Valladolid

desplaza una de las esquinas, el muelle fuerza a la plataforma a moverse en ese sentido. Después de varias pruebas se constató la eficacia del muelle a la hora de permitir el alabeo de la base de los láseres. Cabe destacar que a la hora de calibrar este dispositivo se debe de hacer con cuidado, ya que si se desplaza mucho una esquina hacia arriba o hacia abajo podría deformarse la base entera. Por tanto a la hora de calibrarlo debería hacerse despacio y compensando de dos en dos tornillos sin fin el lado que se quiere alabear.

- Apoyo y agarre de los láseres

Los requerimientos de apoyo y sujeción de los láseres requieren de un sistema amarre que impida que movimientos bruscos precipiten el láser al suelo y por consecuencia este se dañe y a su vez confiera estabilidad a la hora de calibrar el dispositivo.

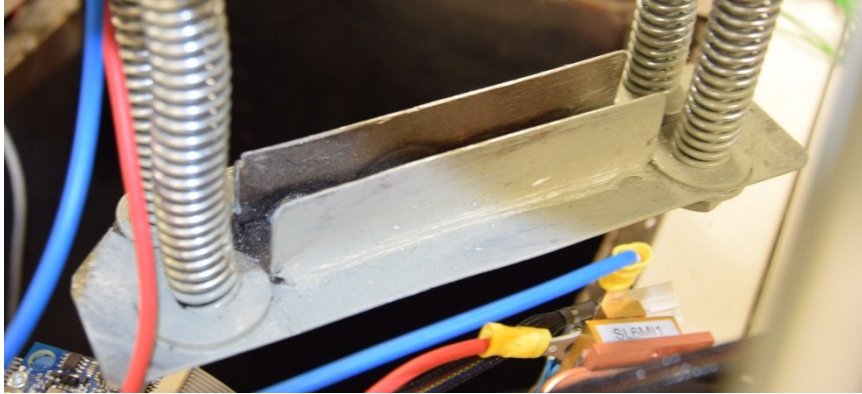
Para conseguir este objetivo se dispuso de una base de chapa de las mismas características que la usada en el dispositivo de movimiento horizontal, 170 x 65 mm de acero de 1 mm de grosor. Esta chapa fue mecanizada en las esquinas practicándole orificios de 10 mm de diámetro para el sistema de movimiento vertical descrito anteriormente. Aprovechando el diseño del propio disipador de calor se diseñó un sistema constituido por dos pequeñas chapas que encajasen en las ranuras de aluminio del disipador y apoyasen en los tubos de cobre que se utilizan para transmitir calor. En la Figura 6.19 se muestra con detalle las características del laminado que permitió este diseño para la sujeción del dispositivo disipador.



**Figura 6.19.-** Detalle de las láminas de las que está constituido el disipador, así como los cilindros de cobre que sirven como conductores térmicos y que permitieron el diseño de la sujeción del mismo a la base.

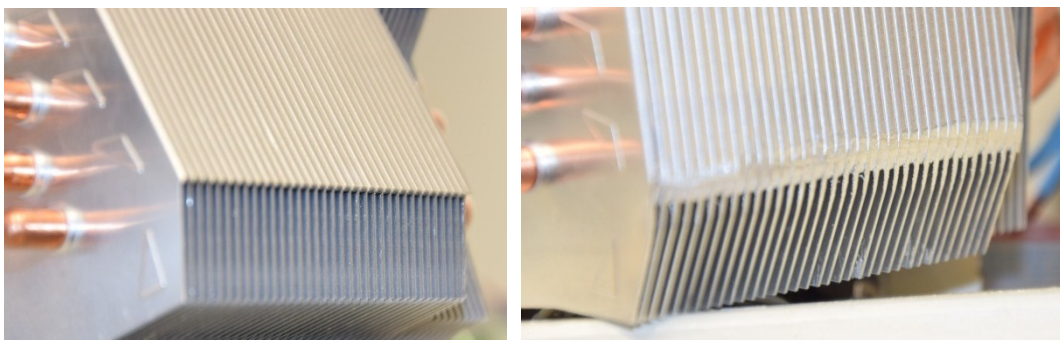
En la chapa base se soldaron dos láminas de 105 x 20 mm y 1 mm de grosor perpendiculares a la base, de tal manera que los 20 mm fuesen la altura de estas chapas. Se dejaron 20 mm de separación entre los bordes de la base y

la soldadura de las chapas y otro 20 mm de separación entre ellas, tal y como se puede observar en la Figura 6.20. De esta manera el conjunto laser + disipador se apoyan de manera estable y con sujeción en la base.



**Figura 6.20.-** Disposición de las láminas de acero utilizadas para la sujeción y apoyo del disipador de calor a la base.

La distancia entre las varillas roscadas utilizadas en el sistema de desplazamiento vertical se calculó para que fuese algo mayor de 3 mm de los 120 mm de ancho que tiene el disipador. De esta manera los propios muelles de los tornillos sin fin que unen la base de los láseres con la chapa del desplazamiento vertical mantuviesen los láseres fijos en la posición de apoyo contra las chapas. Al tener que ser un ajuste fino, los extremos más distantes de los disipadores tuvieron que ser mecanizados ligeramente con una lima para dejarlo en la justa medida, tal y como se aprecia en la Figura 6.21.



**Figura 6.21.-** El antes (izquierda) y el después (derecha) del mecanizado de los disipadores de calor. El limado se efectuó con una lima muy fina para evitar dañar el dispositivo.



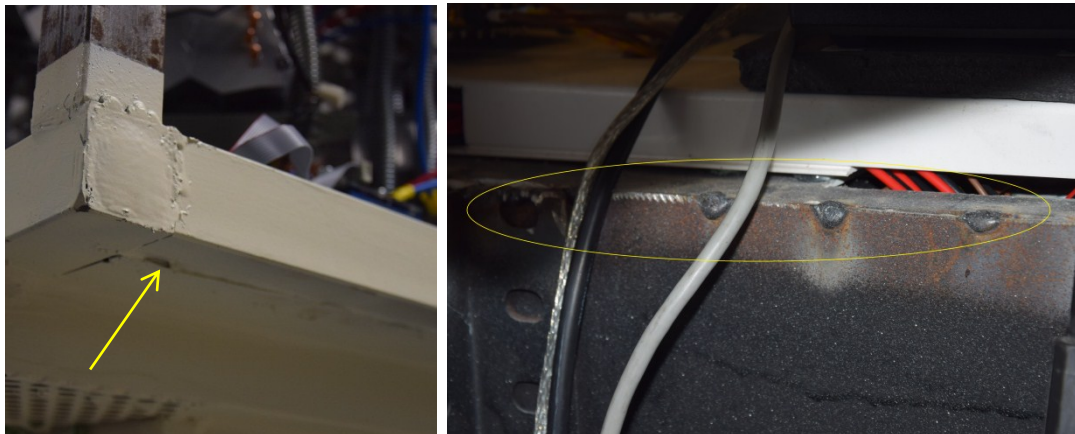


- Sistema de sujeción del soporte de los láseres

El cuerpo del soporte para los láseres fue concebido para ser desmontable, de esta manera se facilita su transporte y la manipulación de los láseres y de los componentes que proporcionan tanto el movimiento horizontal como el vertical y el alabeo a la hora de su construcción y posterior calibración.

Otra característica deseable es la de elevar todo el cuerpo varios centímetros para poder acceder al sistema de cableado que tiene debajo y así poder instalarlo y repararlo, si se diera el caso, de la forma más cómoda.

Para conseguir todo eso, se soldó sobre el armazón vertical respetando el orificio por el cual discurrirían los haces de laser una estructura cuadrada compuesta de tubo estructural rectangular como el usado en el cuerpo del soporte de los láseres de 550 x 550 mm y una chapa de 470 x 470 soldada a la parte inferior e interior de la estructura cuadrada de tubos tal y como se puede apreciar en la Figura 6.22. Esta chapa sirve como apoyo para el sistema de cableado y es el lugar donde se apoyarán el driver y el dispositivo BOB.



**Figura 6.22.-** Unión por la parte inferior entre la chapa que forma la base de apoyo para el sistema de cableado y el tubo estructural que forma la estructura cuadrada (izquierda). Detalle de la soldadura de la chapa la cual es apoyo para el cableado y la estructura vertical (izquierda).

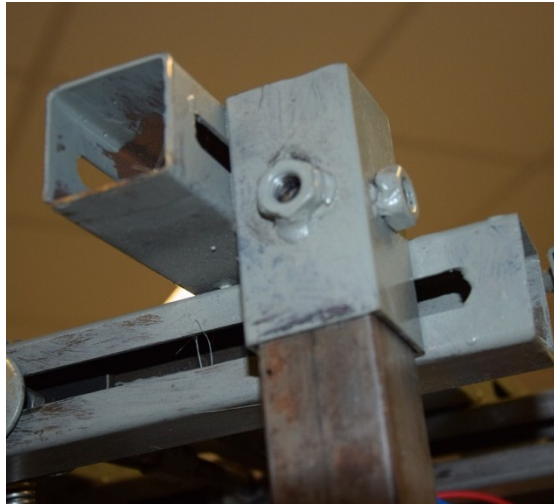
La sujeción y desplazamiento vertical del cuerpo respecto al resto de la estructura se soldaron a escuadra y de forma vertical tubos rectangulares de 35 x 35 mm de sección y 260 mm de altura en las esquinas de la estructura cuadrada descrita anteriormente. Se eligieron tubos de menos sección para que estos pudiesen desplazarse por el interior de los tubos de 40 x 40. Por tanto en las 4 escuadras del cuerpo se soldaron de forma vertical tubos



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

rectangulares de 40 x 40 mm de sección y 80 mm de largo a modo de guías para los de 35 x 35 mm. En estos tubos se mecanizaron dos orificios dispuestos en las caras exteriores y se soldaron dos roscas de 10 mm, tal y como se aprecia en la Figura 6.23. Estas roscas se utilizan para enroscar tornillos a modo de sujeción del cuerpo entero.



**Figura 6.23.-** Detalle del sistema de amarre del cuerpo del sistema de sujeción de los láseres con el resto de la estructura.

- Capota de protección

La acumulación de polvo puede ser un problema para el sistema en general y en concreto para los dispositivos electrónicos y los láseres. Además cuando las condiciones lo requieran se debería aislar aún más el entorno interior de la luz exterior, ya que la parte superior del sistema no tiene un tapa por sí misma.

Por tanto para solucionar este problema se dispuso de una capota fabricada a partir de lona gris oscura que recubriría toda la parte superior impidiendo la entrada de luz directa. Además debido a las necesidades de refrigeración de algunos dispositivos como los láseres y los drivers electrónicos se dispuso también de aperturas de ventilación cubiertas de rejilla con la posibilidad de ser cubiertas por lona mediante un sistema de velcro. En la Figura 6.24 se puede observar al sistema con la capota instalada así como las aberturas de ventilación.



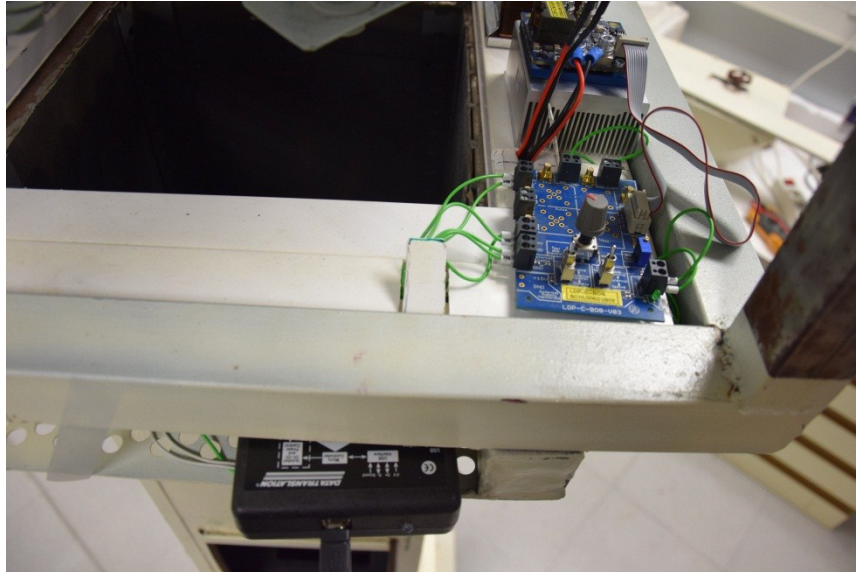
**Figura 6.24.-** Cubierta utilizada para prevenir la acumulación de polvo en los dispositivos electrónicos y los láseres y de prevención de incidencia de luz directa del exterior.

Con esta capota se consiguió una protección adecuada contra la acumulación de polvo y un entorno más hermético contra la luz directa exterior.

#### - **Bandejas de las tarjetas de adquisición de datos**

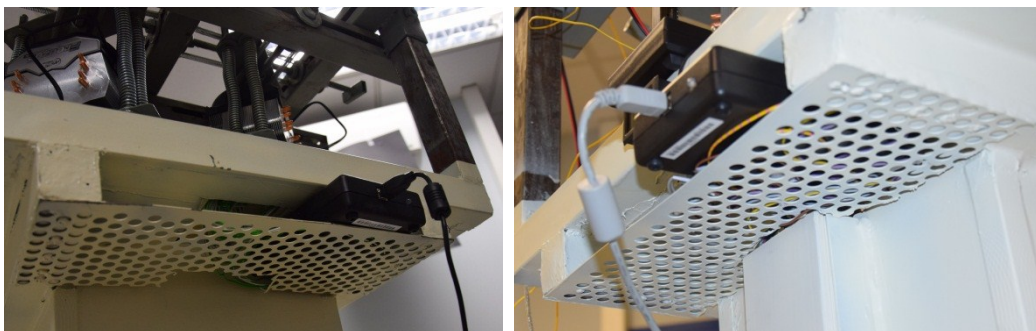
Las tarjetas de adquisición de datos tienen cada una 20 cables de las diferentes señales que se quieren medir y controlar, por tanto había la necesidad de colocarlas de manera que todos esos cables molestasen lo menos posible y pudiesen conducir hasta el dispositivo BOB de la manera más sencilla y discreta posible.

Para solucionar este problema y debido a que el dispositivo BOB se encuentra en la parte superior de la estructura cuadrada que da apoyo al cuerpo del sistema de soporte del láser, tal y como se ve en la Figura 6.25. Se optó por diseñar y construir unas baldas en la parte inferior de la estructura cuadrada descrita anteriormente de manera que mediante un orificio de 80 x 80 mm efectuado en la parte delante y trasera de la chapa de dicha estructura pudiesen discurrir los cables.



**Figura 6.25.-** Posición del dispositivo BOB respecto a las bandejas de las tarjetas de adquisición de datos.

Para su fabricación se soldaron a ambos lados de la estructura vertical y por la parte inferior de la estructura cuadrada que describimos con anterioridad un tubo estructural rectangular de 40 x 40 mm de sección y 550 mm de largo. En los dos extremos de estos tubos se soldó cubriendo toda la parte inferior tal como se aprecia en la Figura 6.26 chapa perforada de acero de 370 x 135 mm y 1 mm de grosor sobre la cual se apoyan, cada una en su respectivo lugar (la DT 9804 en la parte delante y la DT9802 en la trasera), las tarjetas de adquisición de datos. En la Figura 6.26 se pueden ver las tarjetas en sus respectivas baldas.



**Figura 6.26.-** Bandeja de la tarjeta de adquisición de datos DT9802 (izquierda). Bandeja de la tarjeta de adquisición de datos DT 9804 (derecha).

Se eligió una base de chapa perforada para favorecer la refrigeración de las tarjetas.





**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**



## 7- Cableado del sistema

El cableado del sistema se utiliza tanto para la alimentación los sistemas eléctricos de potencia y electrónicos, como para la transferencia de información. La elección de un cableado adecuado a las condiciones de trabajo proporcionará seguridad y buenos resultados.

Para el sistema eléctrico de potencia, el que alimenta los dispositivos, nos interesará que en ningún momento se pueda producir un cortocircuito debido a cables pelados, malas conexiones o elección incorrecta de las secciones de los cables. Por tanto la seguridad y la eliminación de pérdidas innecesarias será una de las prioridades a la hora de elegir el cableado del sistema de alimentación de los equipos, así como todas la aparamenta y accesorios eléctricos.

Para el sistema encargado de la transferencia de información, el cual consta de muchos cables, los cuales no se encargarán de alimentar ningún dispositivo, el aspecto de seguridad no será primordial. Será más importante que el cableado sea, en la medida de los posible, discreto y que esté ordenado de manera que en el caso de tener que desconectar el cableado sea sencillo volver a conectarlo.

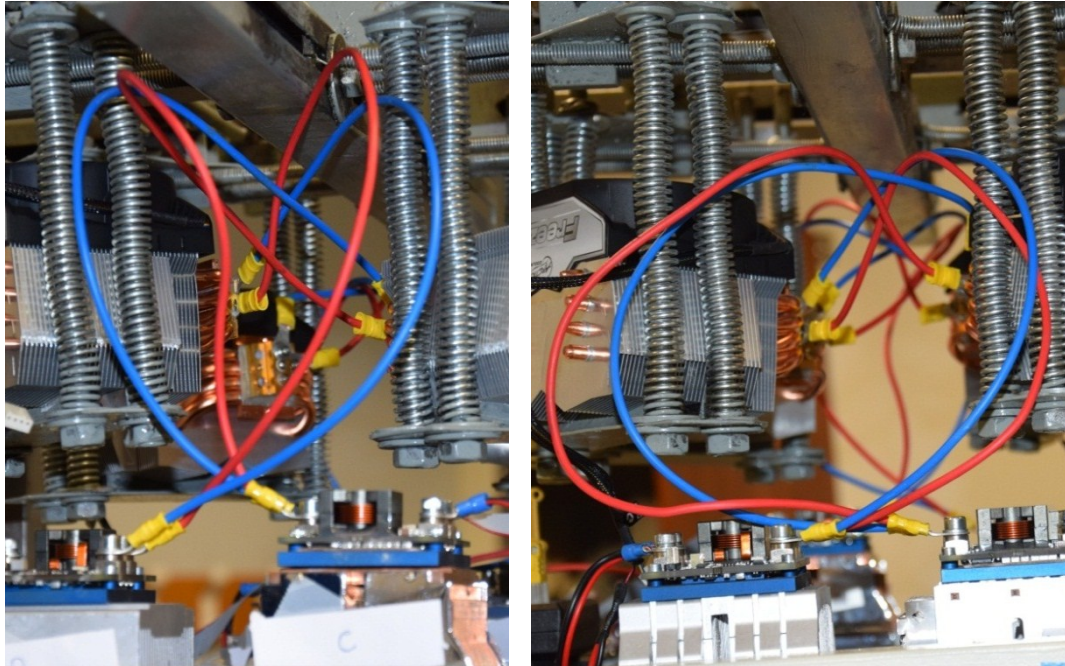
### - Sistema de alimentación de los láseres

El sistema de alimentación de los láseres será el comprendido entre la salida del driver electrónico y la entrada al diodo láser, este sistema de alimentación se efectúa en corriente continua. Es uno de los cableados más críticos, ya que ha de soportar las mayores corrientes, por lo que se diseñará lo más corto posible, para evitar pérdidas innecesarias, pero lo suficientemente largo como para permitir que el láser se desplace tanto de forma vertical como de forma horizontal sin que los cables supongan ningún impedimento. Las intensidades que circularán a la hora de realizar los ensayos podrán alcanzar 25 A. Estas corrientes se desarrollarán a unas tensiones en torno a los 1.8 V, por lo que la potencia máxima que consumirá el láser y por tanto que tendrán que soportar los cables será de unos 45 W.

### - Elección de los cables

La elección de los cables está condicionada tanto por la corriente que circula por ellos como por la potencia que transmiten. Por tanto se eligieron atendiendo a las características técnicas, cables de sección de 4 mm<sup>2</sup>, ya que dichos cables se encontrarán tendidos al aire, Figura 7.1, y en unas condiciones de temperatura ambiente de unos 20°C. Para evitar posibles

conexiones erróneas se ha empleado un código de colores; rojo para la cable correspondiente con la línea positiva y azul para la línea negativa, tal y como se puede ver en la Figura 7.1. De esta manera es sencillo identificar los cables.



**Figura 7.1.-** Cableado de alimentación de de los láseres situados a la izquierda (izquierda). Cableado de alimentación de los láseres situado a la derecha (derecha). En ambas imágenes se pueden observar los colores elegidos para identificar los polos positivo (rojo) y negativo (azul).

El driver electrónico con su sistema de disipación de calor se encuentra ubicado encima de las canaletas por las que discurren el sistema de control de los láseres y el de alimentación del propio driver. Dichas canaletas se encuentran debajo del propio láser por lo que el tendido de los cables se ha efectuado por el aire para evitar que éste sea innecesariamente largo y para permitir que éste se pueda desplazar cuando se desplace el soporte del láser. En la Figura 7.1 se puede ver la forma en la que fue tendido.

- Conexiones del cableado

Las conexiones tanto con el driver electrónico como con el diodo láser se efectúan mediante tornillos. La elección de una conexión que se adapte a ellos y que proporcione una conexión con las mínimas pérdidas y de manera que no se suelte es importante. Por tanto se optó por usar terminales preaislados de latón de ojillo, con el aislante de color amarillo. En la Figura



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

7.2 se muestra una imagen del mismo. Este terminal se adaptaba a la sección de cable utilizada y proporcionaba una sujeción perfecta y mínimas pérdidas.

Se dispusieron estos terminales en ambos extremos tanto en la conexión con el driver como con el láser y para mejorar la sujeción se utilizaron arandelas. En la conexión con el diodo láser el terminal era algo ancho para el espacio que permitía atornillar.



Figura 7.2.- Terminal usado en las conexiones de entre el driver electrónico y el diodo láser

Este problema podía provocar un cortocircuito entre el ánodo y el cátodo, por lo que se mecanizó tanto el terminal como la arandela, tal y como se puede apreciar en la Figura 7.3, de manera que ambos terminales se pudieran conectar sin riesgo de cortocircuitos, comprándose posteriormente con un polímetro y una revisión visual.

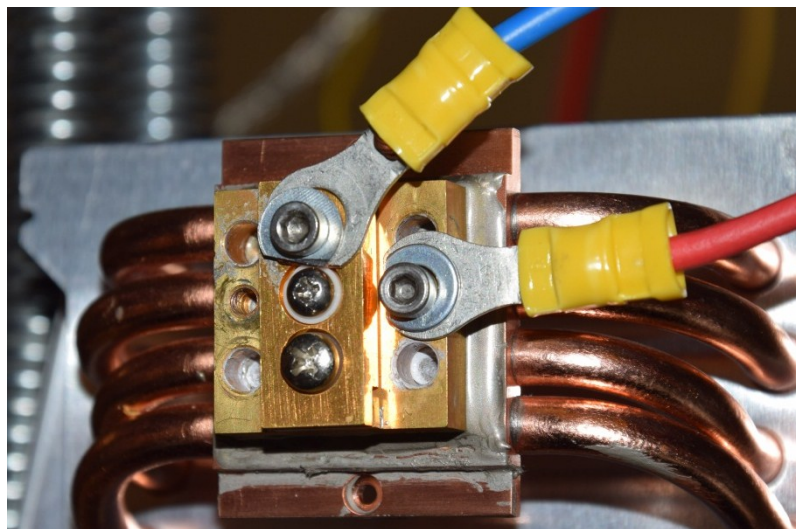


Figura 7.3.- Conexiones realizadas en los dispositivos láser, donde se puede apreciar el mecanizado realizado en las dos conexiones para evitar cortocircuitar el ánodo y el cátodo.



Al realizar la conexión el driver electrónico no deja lugar a dudas ya que tanto la línea positiva como la negativa están diferenciadas en el propio driver. En el caso del diodo láser nos interesará polarizarlo en directa, para que funcione. Eléctricamente el diodo está diseñado para que la parte de arriba (la más estrecha) sea el cátodo del diodo y la parte de abajo (la más ancha) el ánodo, por tanto para la polarización directa se conectará el terminal negativo (el azul) al cátodo (la parte superior) y el terminal positivo (el rojo) al ánodo (la parte inferior).

En uno de los láseres debido a la utilización del mismo en experimentos anteriores la rosca de la conexión del cátodo estaba “pasada”. Por tanto se recurrió a efectuar el anclaje del tornillo con la arandela y el terminal mediante pegamento térmico ya que aguanta temperaturas altas y no es conductor eléctrico. Para disminuir las pérdidas en esta conexión se utilizó también plata coloidal en la unión entre el terminal y el cátodo mejorando la unión eléctrica. En la Figura 7.4 se puede ver el detalle de la conexión.

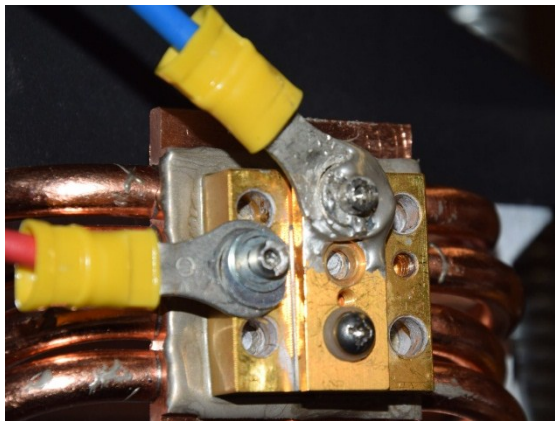


Figura 7.4.- Detalle la conexión realizada mediante el pegamento térmico.

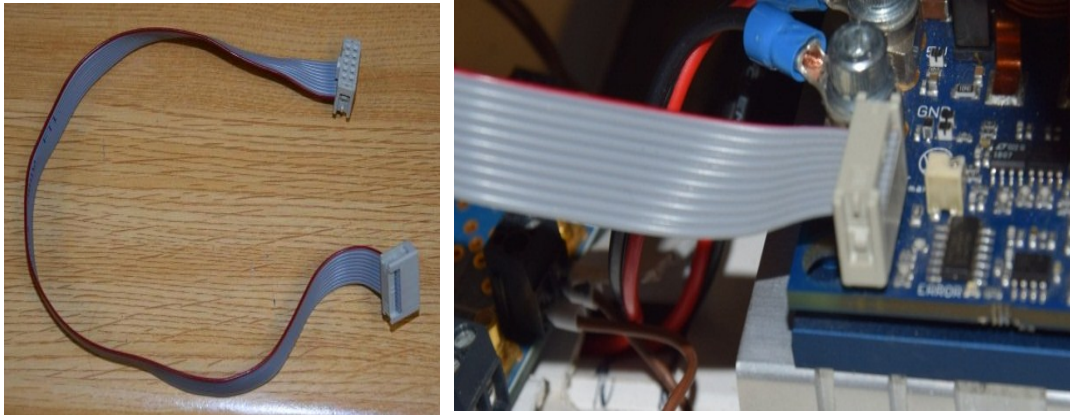
#### - Sistema de control de los láseres

El sistema de control de la corriente que circula por los diodos láser se efectúa a través del driver electrónico, controlado a su vez mediante el dispositivo BOB. Este dispositivo, del que ya se habló con anterioridad, será el encargado del sistema de control.

Tanto la alimentación del dispositivo BOB como la transferencia de datos al driver electrónico se efectúan utilizando el mismo cable, proporcionado por el fabricante que consta de 10 pines en formato bus de datos tal y como se puede ver en la Figura 7.5. La conexión con el dispositivo BOB no da lugar a confusión debido a que sólo existe una posición posible pero con el driver electrónico hay que tener cuidado de no invertir la polaridad, por tanto la



conexión debe hacerse de la forma que se muestra en la Figura 7.5, en la que la parte roja del cable se sitúa hacia el interior del dispositivo.



**Figura 7.5.-** Cable utilizado para la conexión entre el dispositivo BOB y el driver electrónico (izquierda). Conexión correcta en el driver electrónico (derecha).

- Elección de los cables y conexiones

De cada dispositivo BOB saldrán 5 pares de cables; el correspondiente a activarlo o desactivarlo, el correspondiente al control de la corriente del diodo y otros tres que corresponden a las señal que queremos monitorizar. Estos cables no tendrán que transportar mucha potencia, simplemente se encargarán de transportar señales. Los pares de cables estarán compuestos por uno al que llamaremos línea y otro que llamaremos masa.

Los cables elegidos tienen una sección de 0.34 mm<sup>2</sup> ya que por ellos no circulará apenas corriente. Los colores de cable utilizados serán distintos para cada dispositivo BOB, así a la hora de conectarlos con las tarjeta de adquisición de datos no surgirá ninguna confusión respecto a la procedencia del cable, además se ha etiquetado cada par de cables con su procedencia dentro del dispositivo BOB facilitando aún más su conexión, en la Figura 7.6 se puede apreciar dicha etiquetación y alguno de los colores utilizados.

Los dispositivos BOB situados en la parte frontal los cables que corresponden a la activación del mismo y al control de la corriente no serán del mismo color que el resto. Esto es debido a la reutilización de cable ya usado, ya que los cables empleados en el control de los láseres son todos reciclados, abaratando de esta manera el coste del sistema. Estos cables de color diferente no coincidirán con el color usado en otros dispositivos BOB.





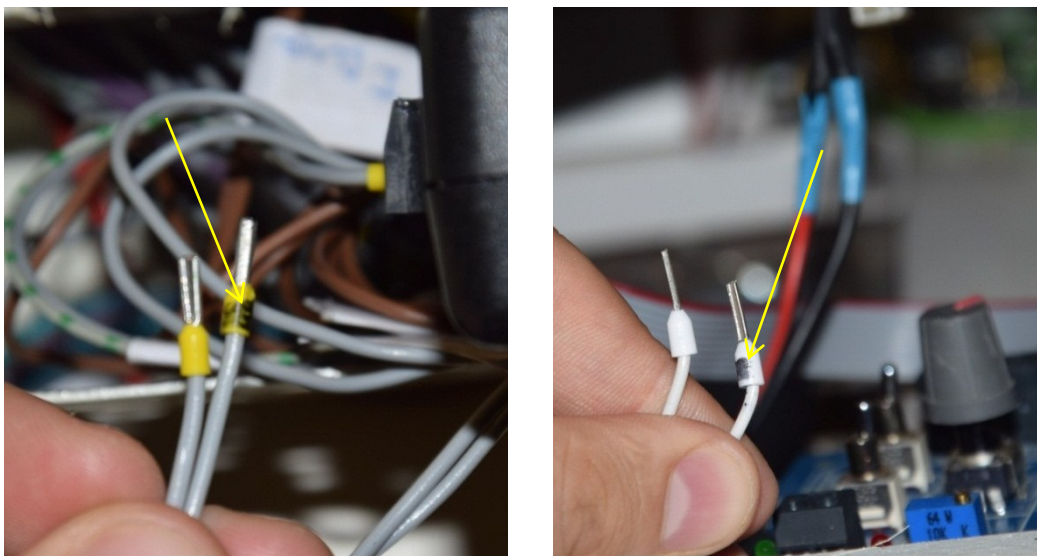
## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid



**Figura 7.6.-** Etiquetación de los cables de control y los colores utilizados para el sistema de control de los láseres de la parte trasera, el verde para el izquierdo y el blanco para el derecho.

Como estos cables se han de conectar y desconectar siempre que se quiera manipular de manera independiente las tarjetas de adquisición de datos se optó por utilizar terminales preaislados de punta hueca para efectuar las conexiones, para evitar el deterioro del cable. Los terminales elegidos para la conexión con el sistema BOB son diferentes a los elegidos para la tarjeta de adquisición de datos. Esto es debido a que para el caso de la conexión con el BOB los terminales correspondientes, amarillos, quedaban sueltos, por lo que se eligió el terminal de sección inmediatamente superior, blancos de 0.5mm<sup>2</sup>. Para distinguir entre cable de línea y cable de masa a la hora de efectuar las conexiones se marcó de negro el terminal correspondiente a la masa. En la Figura 7.7 podemos observar los distintos terminales usados y la marca efectuada para distinguir los cables de línea y de masa.



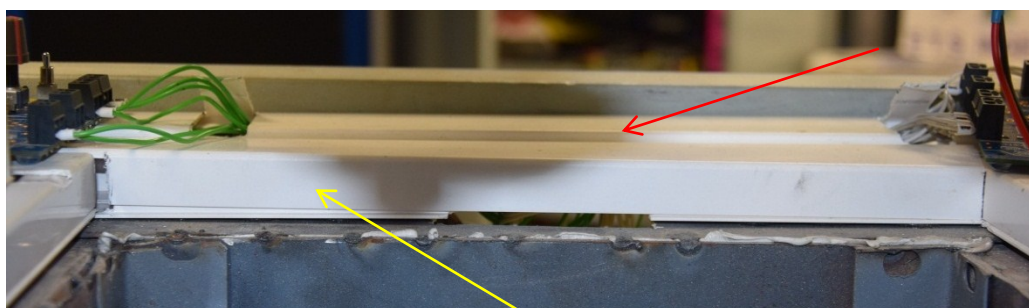
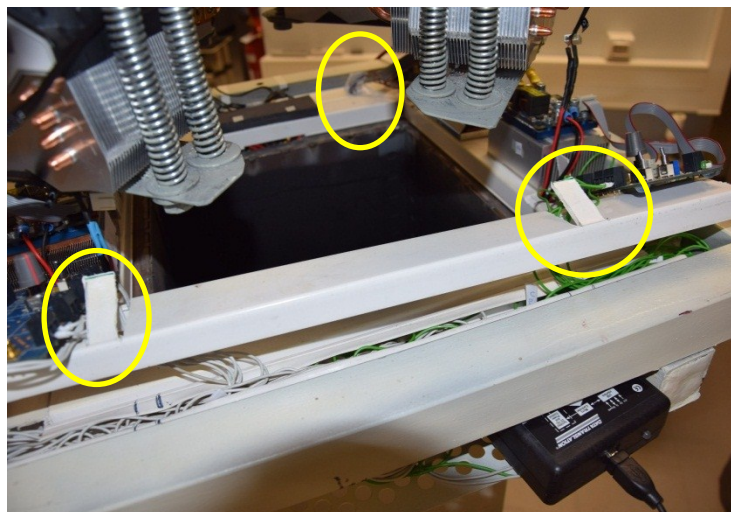
**Figura 7.7.-** Terminales utilizados en la conexiones de la tarjeta de adquisición de datos (izquierda). Terminales utilizados en el dispositivo BOB (derecha). En ambas imágenes aparece señalado por una flecha amarilla el cable de masa con la marca negra.

- Tendido del cableado

Al utilizar 5 pares de cables por dispositivo, son un total de 40 de los que 20 irán al DT9804 y 20 al DT9802. Estos son muchos cables, por lo que será necesario un sistema que los canalice de manera ordenada a sus respectivas tarjetas.

Por tanto se dispuso de canaleta blanca de 20 mm x 40 mm como canalización de estos cables. La elección de dicha canaleta fue por motivos de disponibilidad de dichas canaletas y a su adecuación a las necesidades de tendido. Dicha canaleta si colocó de forma que rodease por la parte interior a la estructura cuadrada que forma la parte superior del armazón vertical, tal y como se puede ver en la Figura 7.8. Adyacente a ésta, se encuentra la canaleta que es usada por el sistema de alimentación del driver del que se hablará posteriormente.

En la tapa de la canaleta se efectuaron orificios para le entrada de los cables procedentes del dispositivo BOB, como se puede apreciar en la Figura 7.8.



**Figura 7.8.-** Disposición de los orificios en la tapa por donde que los cables entran dentro de la canaleta (arriba). Posición de la canaleta del cableado de control de los láseres indicada por la flecha roja y la posición de la canaleta del cableado de alimentación del driver indicada por la flecha amarilla (abajo).



Estos cables discurren por el interior de la canaleta hasta llegar a unos orificios efectuados en la parte inferior de la misma que coinciden con los orificios efectuados en la chapa de la estructura cuadrada que sirve de apoyo para el sistema de soporte del láser de la que se habló en el capítulo 6. Por estos orificios los cables discurren hasta la bandeja de las tarjetas de adquisición de datos, tal y como se puede apreciar en la Figura 7.9. Los orificios efectuados en la parte delante y trasera están diseñados para que puedan salir cables tanto de las canaletas del sistema de control como del sistema de alimentación de los drivers.



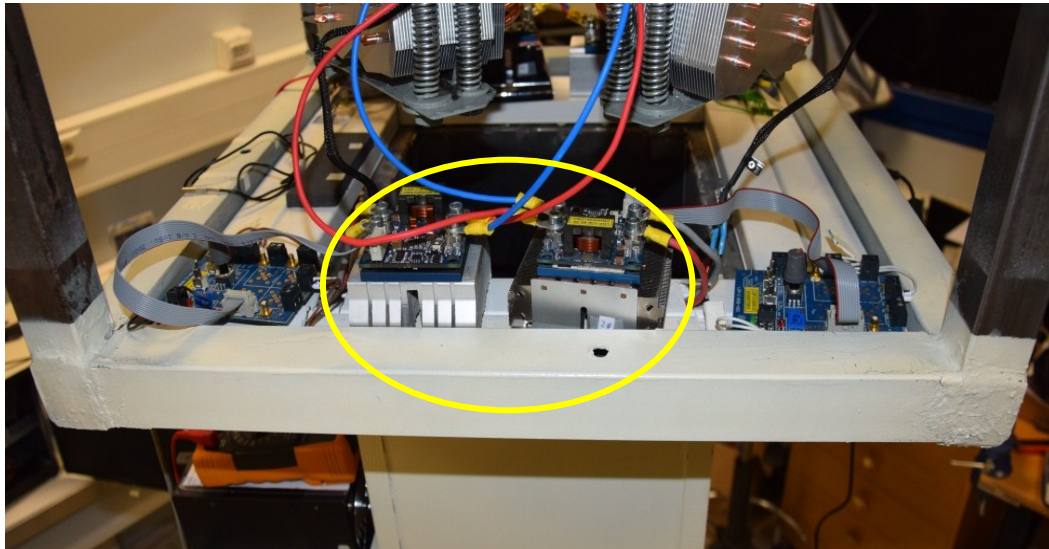
**Figura 7.9.-** Orificio por el cual el cableado de control de la parte de atrás entra a la bandeja de la tarjeta de adquisición de datos DT9802

#### - Sistema de alimentación del driver electrónico

La tensión de alimentación del driver es de 5 V en continua, para conseguir esto se utilizan las fuentes de alimentación que se describen en el capítulo 4. Los drivers se encuentran situados al lado de los dispositivos BOB dentro de la estructura cuadrada que sirve de apoyo para el soporte de los láseres, tal y como se ve en la Figura 7.10.

Las fuentes de alimentación tienen su propio cableado, pero este cableado es insuficientemente largo como para llegar hasta los drivers por lo que se necesitará empalmar cable para conseguir la longitud adecuada.





**Figura 7.10.-** Posición de los drivers electrónicos dentro la estructura cuadrada de la parte superior, indicados mediante el círculo amarillo.

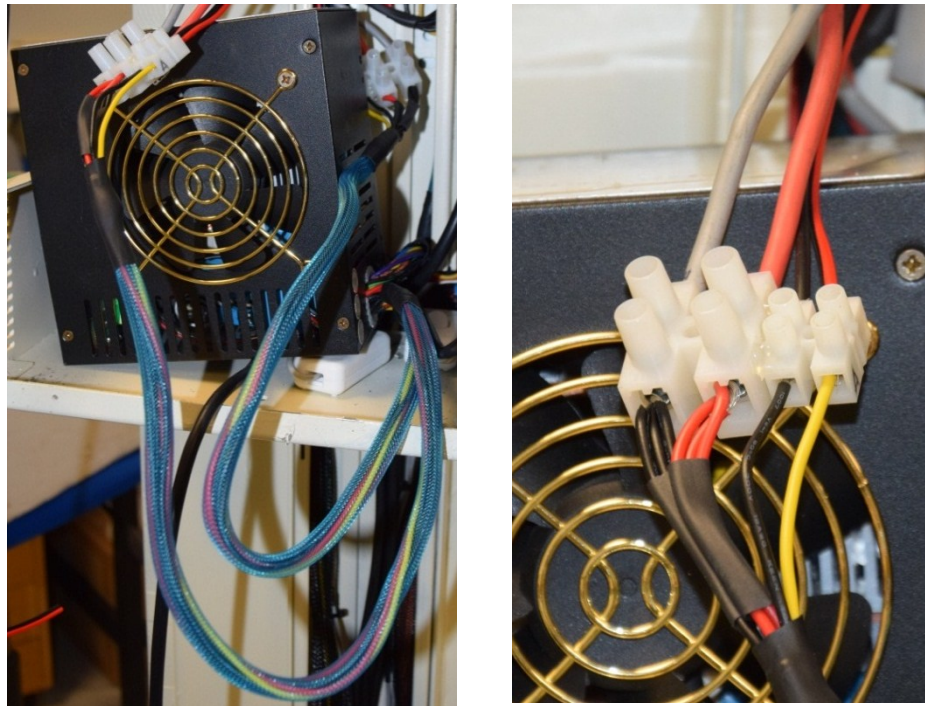
- Cableado de la fuente de alimentación

La fuente de alimentación proporciona 3 tensiones positivas diferentes; 12 voltios, 5 voltios y 3.3 voltios. Cada cable perteneciente a una de estas tres tensiones tiene su color; para los 12 V es el amarillo, para los 5 V es el rojo y para los 3.3 V es el naranja. Para la alimentación del driver utilizaremos cableado rojo, 5 V, (línea positiva) y negro (línea negativa) ya que habitualmente en corriente continua es el que corresponde a masa.

Los cables utilizados en la fuente de alimentación no están diseñados para soportar corrientes muy elevadas, tienen una sección de 1.5 mm<sup>2</sup>. El driver utiliza un sistema de conversión Buck, el cual se explicó con anterioridad en el capítulo 4, por lo que la corriente que consume puede llegar a ser similar a la del diodo láser. Por tanto cada salida de 5 V de la fuente de alimentación estará constituida por 3 cables, como se puede ver en la Figura 7.11.

Los cableados de las salidas de 5 y 12 V se agruparon de forma que cada unión alimentase al driver electrónico y al sistema de refrigeración del mismo láser, Como se puede observar en la Figura 7.11. Esta agrupación se efectuó mediante malla y termorretráctil de forma que el cableado quede más ordenado y se pueda distribuir más fácilmente en la canaleta correspondiente, Figura 7.11.

Este cableado será el utilizado hasta el empalme, a partir del cual se cambiará tanto el tipo de cable como el color utilizado.



**Figura 7.11.-** Agrupación de los cables de 5 y 12 V pertenecientes al driver y el ventilador de refrigeración del mismo laser. Se puede apreciar el uso de malla azul y termorretráctil en sus extremos (izquierda). Detalle de la unión entre el cableado de la fuente de alimentación y el cableado adicional donde también se puede apreciar los tres por polo de la fuente de alimentación utilizados para la línea de 5 V (derecha).

La alimentación de los drivers se hace de forma que la fuente Thermaltake alimente a los drivers electrónicos controlados mediante la tarjeta DT9802 y la VANTEC alimente a los drivers que controla la DT9804. Para facilitar la automatización del sistema.

- Empalme

El empalme de ambos cableados puede efectuarse de forma que este quede fijo y no se pueda desmontar al menos de manera sencilla (estañando el cable y posteriormente asilándolo) o de forma que este empalme se pueda montar y desmontar por razones de facilidad a la hora de tender el cable o para facilitar su traslado, utilizando terminales o regletas, por ejemplo.

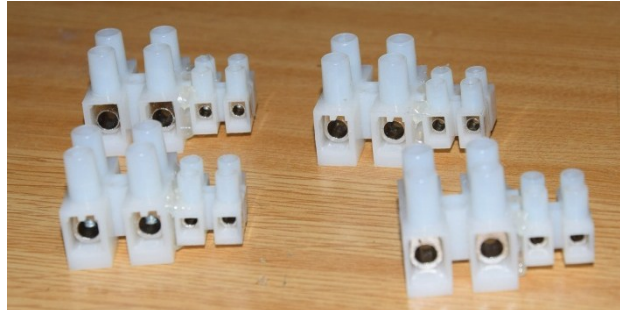
En este caso se optó por utilizar un empalme desmontable para facilitar el tendido del cable y mantener la separación entre cableado propio de la fuente de alimentación y el utilizado para alimentar el driver. En primera instancia se utilizaron terminales macho y hembra para efectuar el empalme, pero debido a problemas tanto de aislamiento como de robustez del empalme se optó por la utilización de regletas. Las regletas utilizadas son las que se pueden apreciar en la Figura 7.12. La regleta es la unión de una regleta de sección



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

suficiente para el cableado de 5 V y otra de sección menor para el cableado de 12 V, ya que ambas salidas discurren juntas. La unión de ambas se efectuó utilizando silicona caliente.

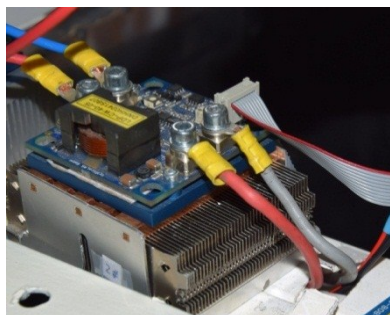


**Figura 7.12.-** Regletas utilizadas para la unión del cableado tanto de alimentación de los drivers como de alimentación de sistema de refrigeración de las fuentes de alimentación y el cableado adicional. La unión del cableado de los driver se efectúa mediante la regleta grande y la de los ventiladores de refrigeración mediante la pequeña.

El empalme efectuado entre el cableado de la fuente de alimentación y el adicional es el que podemos ver en la Figura 7.11.

### - Cableado adicional

El cableado adicional utilizado para la alimentación del driver ha de tener sección suficiente para aguantar por lo menos la misma corriente que el utilizado para la alimentación de los dispositivos láser por tanto se utilizó cable de sección de 6 mm<sup>2</sup>, ya que dicho cableado irá por las canaletas dispuestas en la parte superior de la estructura y no dispondrán de la misma refrigeración de los utilizados para los diodos láser. Los colores utilizados son rojo para el polo positivo y gris para el negativo (en este caso masa) como se puede ver en la Figura 7.13.



**Figura 7.13.-** Cableado adicional utilizado para la alimentación del driver electrónico, rojo para la línea positiva y gris para la negativa.

La utilización de estos cables es debida a la disponibilidad de los mismos, los cuales fueron reutilizados de un dispositivo anterior, aprovechando los



terminales que ya tenía instalados en uno de los extremos. Dichos terminales son parecidos a los utilizados en la salida del driver, Figura 7.2, de los cuales ya se habló con anterioridad.

- Canaletas

La canalización del cableado que alimenta el driver se realiza a través de dos tipos de canaletas diferentes. La más pequeña, se encuentra en la parte superior de la estructura y es adyacente a la utilizada en el sistema de control de los láseres, como se puede observar en la Figura 7.8. Dicha canaleta tiene las mismas características que la utilizada en el sistema de control. Para acceder a los drivers se efectuaron orificios en la tapa similares a los utilizados para el sistema de control del BOB. Estos orificios también son utilizados para la alimentación de los ventiladores del sistema de refrigeración de los láseres. En la Figura 7.14 se puede observar la forma de las aberturas efectuadas.



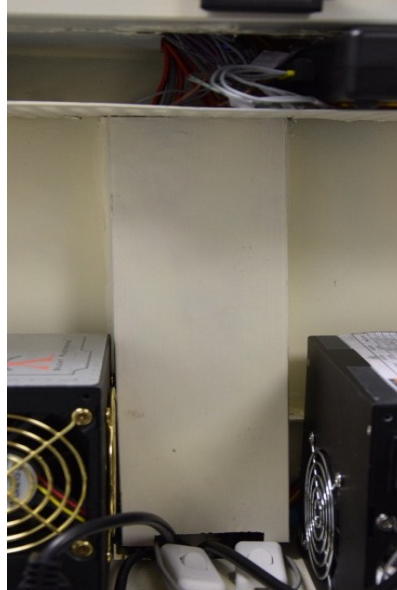
**Figura 7.14.-** Orificios efectuados en la tapa de la canaleta para la salida del cableado de alimentación de los drivers y del sistema de refrigeración de los láseres.

A diferencia del cableado de control del dispositivo BOB, el cual se controla mediante dos dispositivos uno en la parte de en frente y otro en la parte de atrás. El cableado de alimentación de los drivers y del sistema de refrigeración de los láseres converge en un mismo punto, la parte frontal. Esto es debido a que las dos fuentes de alimentación están situadas en la bandeja dispuesta para eso. Por tanto al converger todo el sistema de alimentación en ese punto se optó por utilizar una canaleta de mayores dimensiones que pudiese recoger todo el cableado sin ningún problema de espacio.

Las dimensiones de la canaleta son de 90 mm de ancho por 40 mm de alto y la longitud de la misma es 260 mm, la distancia entre la balda en la que se apoya la tarjeta de adquisición de datos DT9804 y la base de las fuente de



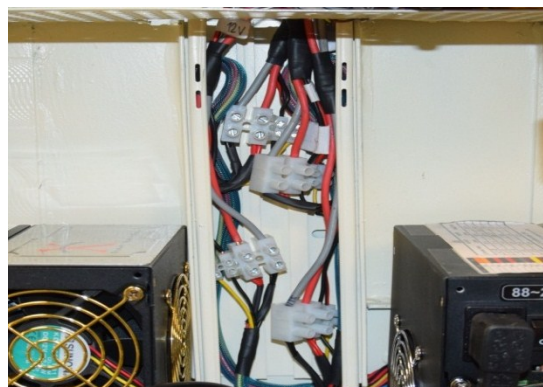
alimentación. Dicha canaleta está situada justo en la bajante del orificio efectuado en la chapa tal y como se muestra en la Figura 7.15.



**Figura 7.15.-** Canaleta utilizada para el sistema de alimentación de los drivers y para el sistema de refrigeración de los láseres en la convergencia de los mismos.

- Colocación del cableado en la canaleta

Debido al tamaño de las regletas la colocación dentro de la canaleta no es sencilla por lo que se optó en disponer de distinta longitud de cable a las líneas de cableado adicional de manera que cada empalme se efectuase a distinta altura, de esta manera la colocación no es tan complicada y se deja espacio para el resto del cableado. La colocación final se puede observar detalladamente en la Figura 7.16.



**Figura 7.16.-** Colocación del cableado de alimentación de los drivers y los ventiladores en la canaleta a la salida de las fuentes de alimentación.



- Sistema de alimentación de los dispositivos de refrigeración

El sistema de refrigeración de los drivers electrónicos se efectúa utilizando simplemente un disipador pegado mediante pasta térmica a la parte inferior del mismo. El propio driver ya tiene por sí mismo una capacidad de disipación de 30 W, que unida a la del disipador instalado consiguen la refrigeración efectiva del dispositivo. Por otro lado la refrigeración del láser es más complicada al ser dispositivos más pequeños, más sensibles y con mayor consumo. Por esa razón se utilizó el conjunto disipador ventilador explicado en el capítulo 4. Las características y el aspecto físico del ventilador están en la Figura 4.4.

- Cableado de la fuente de alimentación

La alimentación de los ventiladores se efectúa a 12 V, por tanto se tendrán que utilizar los cables de color amarillo de la fuente de alimentación, que son los que corresponden a dicha tensión. A diferencia de la alimentación del driver el consumo de los ventiladores es mínimo, 2.28 W a 0.18 A. Los cables de 12 V tienen la misma sección que los de 5 V, 1.5 mm<sup>2</sup>, por lo que solamente se utilizará un cable amarillo para el polo positivo y un cable negro para el negativo.

El cableado de 5 y 12 V se agrupó tal y como se definió en el apartado del sistema de alimentación de los drivers, mediante malla y termorretráctil, tal y como se puede ver en la Figura 7.11.

- Empalme

El sistema de unión utilizado es el definido anteriormente en el apartado del sistema de alimentación de los drivers, en el que se usaba una forma de unión desmontable como la regleta para favorecer la instalación y la mantenibilidad del sistema, Figura 7.12. El empalme del cable de 12 V se efectúa mediante la regleta pequeña ya que la regleta grande no proporcionaba la sujeción adecuada. En la Figura 7.11 se puede ver el empalme efectuado.

- Cableado adicional

Para la parte del cableado adicional del sistema de refrigeración el cual tiene un consumo muy pequeño se optó por el uso de un cableado sencillo y de



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

sección pequeña que no ocupase demasiado espacio dentro de la canaleta. El cable usado tiene unidos ambos polos por lo que ocupa menos espacio y es mucho más sencilla su instalación, en la Figura 7.17 se puede ver el cable utilizado.

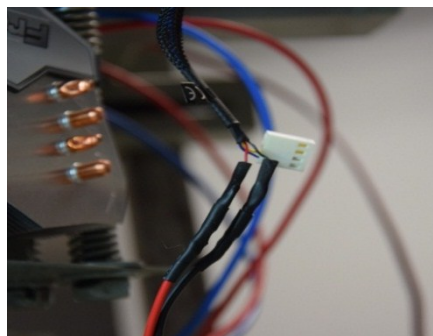


**Figura 7.17.-** Cable usado para la instalación del sistema de alimentación de los ventiladores.

Los colores utilizados son rojo para la línea positiva y negro para la línea negativa. La corriente que circula por el cableado es de 0.18 A, muy poco, por lo que se eligió una sección de 0.75 mm<sup>2</sup> por razón de espacio.

Los ventiladores tienen un conector de 4 pines. Dos para la variación de velocidad del aparato y los otros dos para su alimentación. Para la refrigeración utilizaremos los ventiladores a plena potencia siempre, por lo que las conexiones de control se desecharan y solo se utilizarán las de alimentación.

La conexión se efectuó sacando las clavijas rojas (polo positivo) y negra (polo negativo) del conector y estañando estas al cable de alimentación. Posteriormente se aplicó cinta aislante y se recubrió con termorretractil para aislar la conexión. En la Figura 7.18 se puede ver con detalle el aspecto final de la conexión.



**Figura 7.18.-** Conexión realizada para la alimentación de los ventiladores, se estañaron los extremos y se aisló mediante termorretractil. El cableado de control (cables azul y amarillo) no fue eliminado, pero no se utilizó.



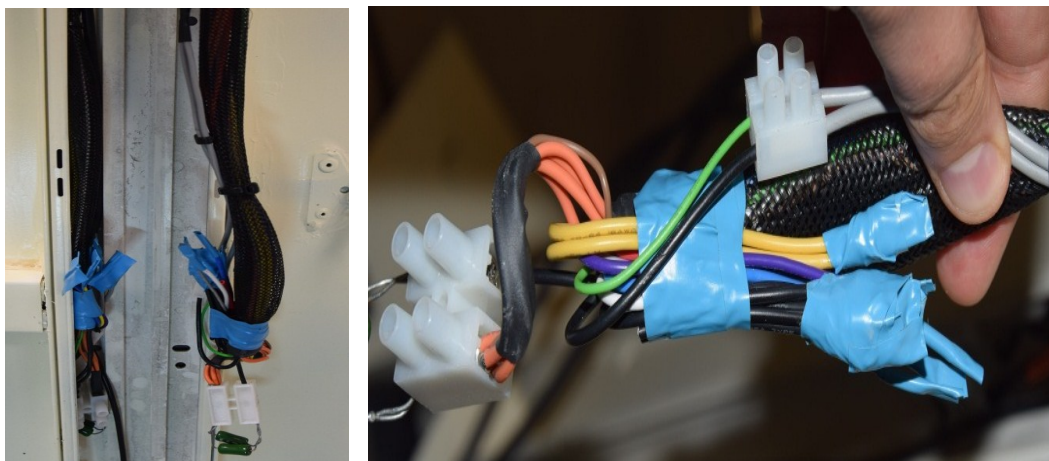
La polarización correcta es importante, ya que los ventiladores utilizados para la disipación de calor no admiten la inversión de sus polos, lo que en principio variaría el sentido de giro.

Los cables de alimentación de los ventiladores discurren por las mismas canaletas que el sistema de alimentación de los drivers, Figura 7.8 y utilizan los mismos orificios para acceder a los ventiladores, Figura 7.14.

- **Sistema de alimentación y cableado auxiliar de las fuentes de alimentación**

Para el funcionamiento correcto de las fuentes de alimentación ya se comentó en el capítulo 4 que era necesario establecer una corriente mínima por algunas salidas de la fuente de alimentación. Esto lo habíamos conseguido mediante los ventiladores en 12 V, los láseres en 5 V y la instalación de resistencias en 3.3 V. Además también se habló de la necesidad de unir el cable verde de la clavija de 24 pines con una toma a masa (negra) para que las fuentes funcionasen y que dicho sistema se había controlado mediante la instalación de interruptores.

Para efectuar dichas conexiones se utilizó el cableado de la clavija de 24 pines, dicho cableado se agrupó mediante malla y cinta aislante. Se usaron los cables necesarios y se aisló mediante silicona y cinta aislante el resto, para una posible ampliación del sistema. En la Figura 7.19 se puede apreciar el aislamiento efectuado y el agrupamiento de los cables dentro de la canaleta principal.



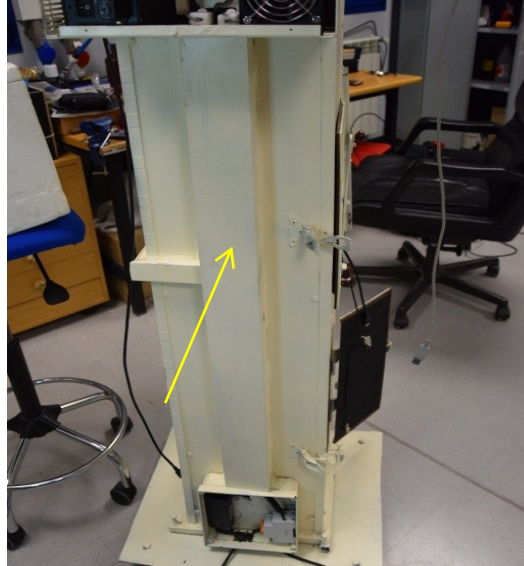
**Figura 7.19.-** Disposición y agrupamiento del cableado de la clavija de 24 pines (izquierda). Aislamiento de los cables no utilizados de la clavija de cuatro pines (derecha)



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

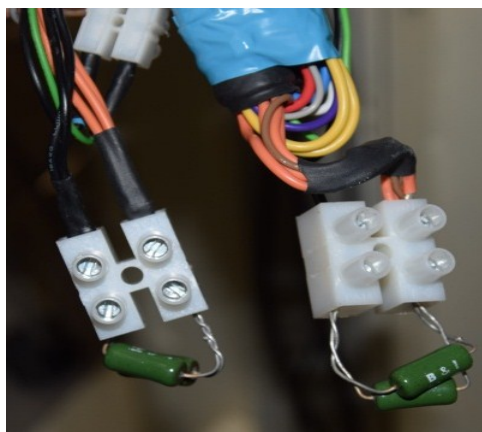
La canaleta principal es la encargada la que se encuentra entre la bandeja de las fuentes de alimentación y la caja de conexiones. En la Figura 7.20 podemos ver dicha canaleta.



**Figura 7.20.-** Canaleta principal del sistema (señalada por la flecha amarilla), de las mismas características que la utilizada entre la base de las tarjetas y la base de las fuentes.

### - Cableado de 3.3 V

Para la realización del cableado de 3.3 V y así conseguir la corriente mínima necesaria se unieron todas las salidas de dicha tensión (naranjas) e igual número de cables de masa (negros), Figura 7.21 y se conectaron mediante una regleta las resistencias. Tal y como se puede ver en la Figura 4.2.

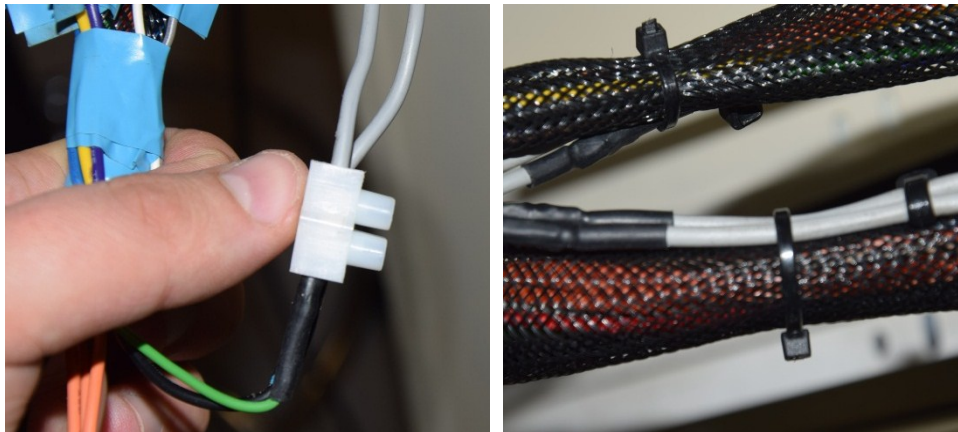


**Figura 7.21.-** Conexión de las resistencias y las líneas de 3.3 V (naranja) y masa (negro).



- Cableado de encendido

Para la realización de este cableado se utilizó el cable de color verde y un cable de masa de las propias fuentes. La unión de ambas se controló mediante la instalación de interruptores, los cuales se situaron en la bandeja de las fuentes de alimentación, Figura 4.1. El cable adicional utilizado es de color gris, ambos polos, ya que no existe la necesidad de diferenciar polaridades el empalme entre el cable gris y los de la fuente se efectuó mediante una regleta, Figura 7.22. Este cable se unió con el resto de la agrupación explicada anteriormente mediante bridas.

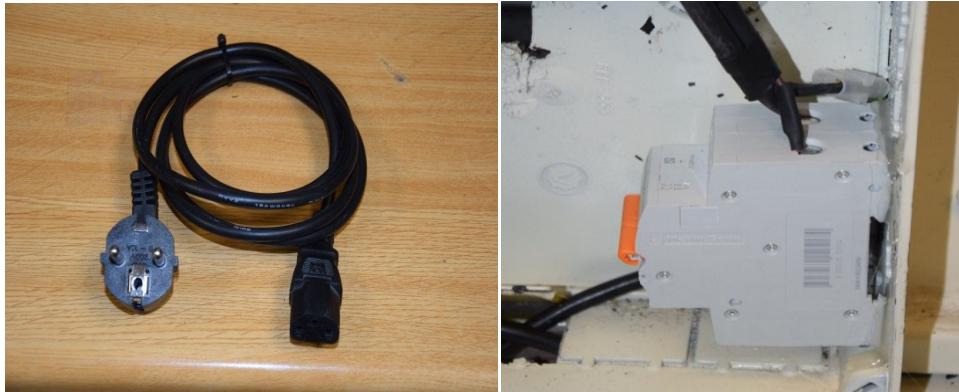


**Figura 7.22.-** Empalme del cable adicional gris y las líneas verde y masa de la fuente por medio de una regleta (derecha). Bridas utilizadas para unir el cableado de la clavija de 24 pines y el cable adicional de los interruptores (izquierda).

- Alimentación de las fuentes

Las fuentes se alimentan directamente de la red, para ello se utiliza un cable normal de tres hilos con clavija schuko, como el que aparece en la Figura 7.23. Ambos cables discurrirán por la canaleta principal hasta la caja de conexiones, donde se unirán en un solo cable. La canaleta principal se encuentra entre la bandeja de las fuentes de alimentación y la caja de conexiones.

El consumo conjunto de ambas fuentes de alimentación es de 16 A máximos. Para protegerlas a ambas se ha instalado un magnetotérmico bipolar de 20 A en la caja de conexiones. El cable de tierra se ha unido mediante una regleta. En la Figura 7.23 se puede observar la instalación realizada.



**Figura 7.23.-** Cable de tres hilos utilizado para la alimentación de las fuentes (izquierda). Magnetotérmico utilizado para la protección de las fuentes y línea de tierra empalmada mediante una regleta (derecha).

#### - Sistema de alimentación y datos de la cámara CCD

La cámara CCD tiene dos posiciones distintas, una situada en la parte inferior de la estructura vertical que es utilizada en toma de imágenes por transmisión y otra situada en la estructura adicional utilizada para la toma de imágenes por reflexión. Debido a estos tanto el sistema de alimentación como el de datos de la cámara tiene que desmontarse y montarse cada vez que se cambia de disposición.

La alimentación de la cámara es totalmente independiente de la de las fuentes de alimentación y se alimenta también directamente de la red. El cable utilizado es el proporcionado por el fabricante. Consta de dos partes, la fuente de alimentación de la cámara (que posee cable con la clavija DB-15 para la conexión con la cámara) y el cable con la clavija schuko para la conexión a la red. En la Figura 7.24 podemos ver el cable de alimentación.



**Figura 7.24.-** Las dos partes del cable usado para la alimentación de la cámara (izquierda). Cable Firewire utilizado para la comunicación de la cámara con el ordenador (derecha).

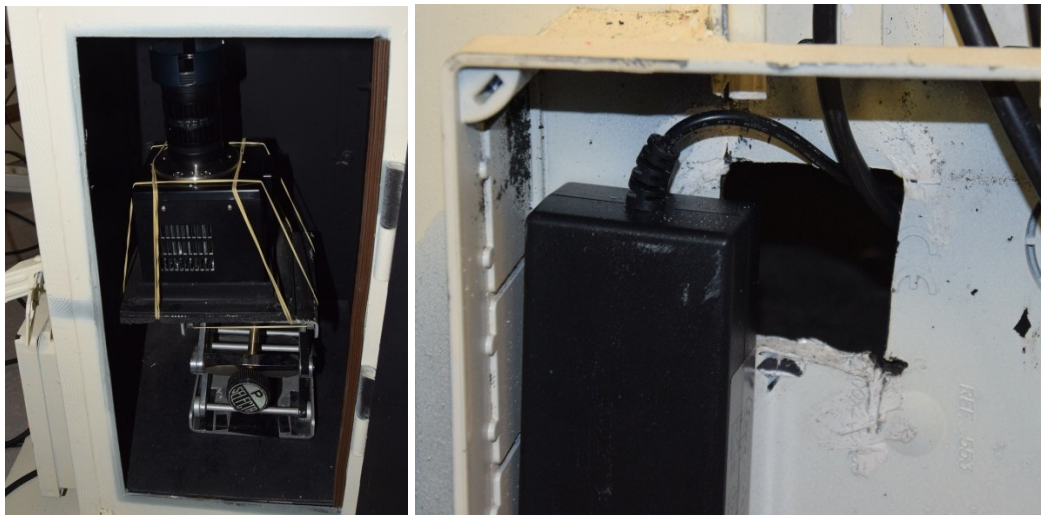


El cable utilizado para la comunicación de la cámara con el ordenador se efectúa mediante un cable Firewire, este cable es proporcionado por el fabricante, en la Figura 7.24 podemos ver una imagen del mismo. La conexión con el ordenador se efectuará por la parte frontal del sistema para facilitar la conexión.

Tanto el cableado de alimentación como el de comunicación discurren juntos.

- Posición de Transmisión

Cuando se efectúan medidas por transmisión la cámara CCD se encuentra en la parte inferior, Figura 7.25. En esta posición la cámara se encuentra al lado del cuadro de conexiones, por lo que se efectuó un orificio en la parte posterior por el cual el cable de alimentación saliese directamente hacia la caja de conexiones, en la Figura 7.25 se puede observar el orificio efectuado en el armazón de la estructura vertical.



**Figura 7.25.-** Cámara CCD ubicada en la parte inferior para las medidas por transmisión (izquierda). Orificio efectuado en la caja de conexiones para pasar los cables de alimentación y comunicación (derecha).

- Posición de Reflexión

Cuando se efectúan medidas por reflexión la cámara CCD se encuentra en la estructura adicional diseñada exclusivamente para este fin, Figura 7.26. La disposición del cableado en esta posición es más complicada, el cableado sale hacia el exterior de la estructura por un orificio efectuado en la misma, el



cual se ha sellado de manera que no entre la luz exterior, en la Figura 7.26 se puede ver el orificio.



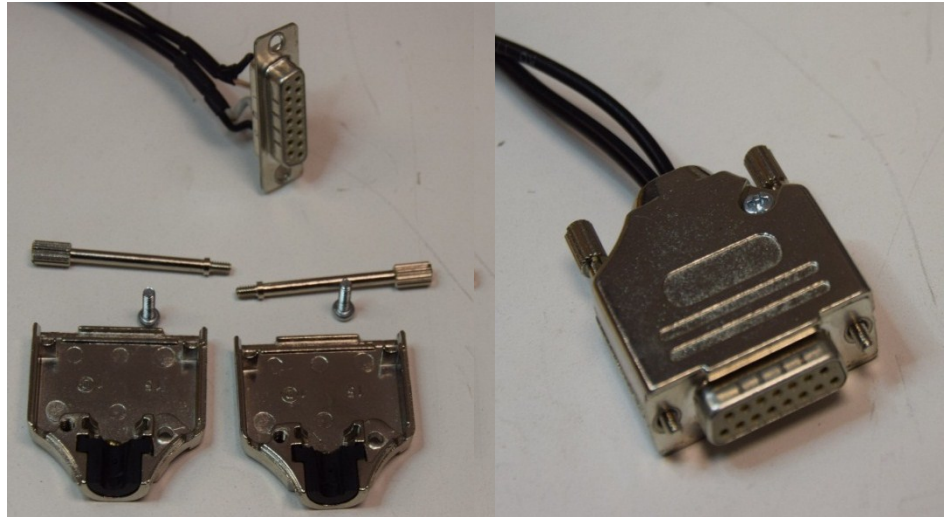
**Figura 7.26.-** Cámara CCD ubicada en la estructura adicional para las medidas de reflexión (izquierda). Orificio de salida del cableado por la parte interior de la estructura (arriba-derecha). Orificio de salida del cableado por la parte exterior de la estructura (abajo-derecha)

A partir de ahí el cable discurre por una canaleta instalada por la parte exterior a 750 mm de la base, dicha canaleta es de las mismas características que la utilizada en el sistema de control del dispositivo BOB, en la Figura 7.27. Esta canaleta termina en la canaleta principal por la que discurre el cableado de alimentación de las fuentes, que ya se explicó anteriormente Figura 7.20 apartado anterior, hasta la caja de conexiones.



**Figura 7.27.-** Canaleta utilizada para canalizar el cableado de la estructura adicional hasta la canaleta principal.

El conector de la alimentación es demasiado grande para caber por el orificio de la estructura por lo que cada vez que se cambie de posición habrá que desmontarlo tal y como se ve en la Figura 7.28.



F

**Figura 7.28.-** Clavija de alimentación de la cámara desmontada con todas sus piezas (izquierda). Clavija de alimentación de la cámara montada (derecha).

- **Sistema de comunicación de las tarjetas de adquisición de datos con el ordenador**

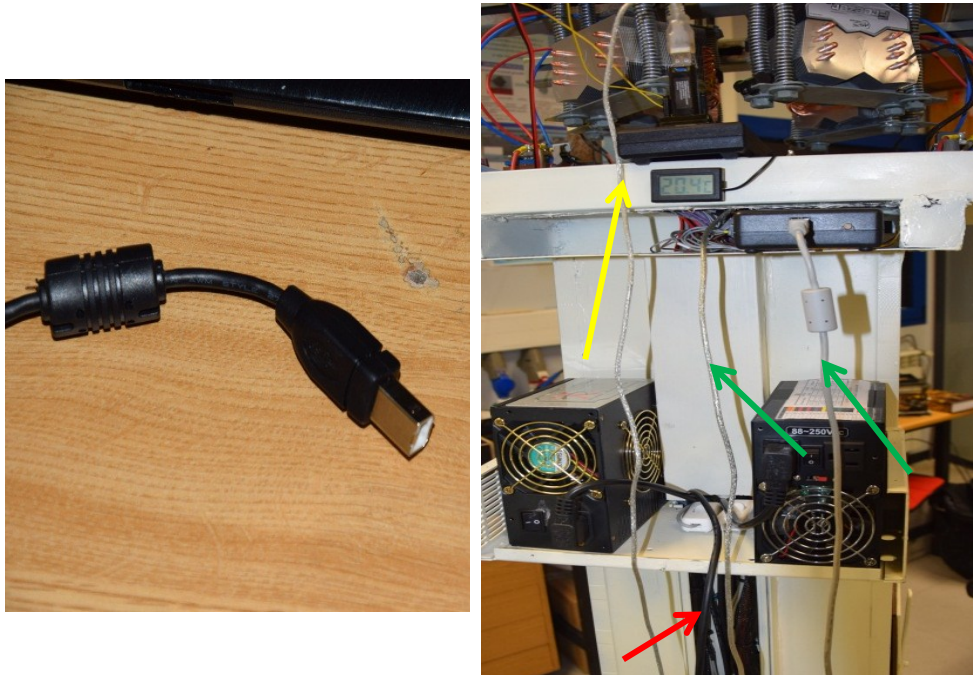
Las tarjetas de adquisición de datos DT9804 y DT9802 son compatibles con el protocolo de transferencia de datos USB, por lo que la comunicación de éstas con el ordenador se efectuará a través cables USB. Las clavijas de conexión de las tarjetas son USB tipo B que es el que aparece en la Figura 7.29.

Los cables utilizados incorporan un sistema de filtrado de ruido constituido por una ferrita rodeando el cable, esto ha sido necesario debido a problemas de reconocimiento de los dispositivos por el propio ordenador.

En el caso de la DT9804 que se encuentra en la parte frontal no hay ningún problema con el tendido del cableado pues el cable irá conectado directamente desde la tarjeta para mayor comodidad. Pero en el caso de la DT9802 que se encuentra en la parte posterior, se ha dispuesto de un cable de mayor longitud el cual se tenderá por la canaleta de alimentación de los drivers y el sistema de refrigeración hasta la bandeja de la DT9804 de esta manera la conexión de ambos cables se efectuará por la parte frontal. En

la Figura 7.29 se pueden ver ambos cables para su conexión por la parte frontal.

En dicha imagen también aparecen los cables de comunicación utilizados por el resto de sistemas que requieren algún tipo de comunicación con el ordenador. Estas conexiones se efectúan desde la parte frontal para facilitar la conexión con el ordenador.



**Figura 7.29.-** Clavija tipo B utilizada por las tarjetas de adquisición de datos (izquierda). Cables de comunicación conectados por la parte frontal; control de temperatura (flecha amarilla), comunicación de la cámara CCD (flecha roja) y comunicación de las tarjetas de adquisición de datos (flecha verde) (derecha).

- **Sistema de comunicación del sistema de control de la temperatura de los láseres**

El datalogger utilizado para el control de la temperatura de los láseres es algo del año 1992, por lo que la clavija que utiliza para la comunicación con el ordenador es una DE-9 de nueve pines, por lo tanto para facilitar la conexión con el ordenador y evitar la utilización de dicha clavija se dispuso de un adaptador a USB de la marca Digitus, en la Figura 7.30 se puede ver el adaptador utilizado.





Universidad de Valladolid

## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA



**Figura 7.30.-** Adaptador utilizado para el datalogger encargado del control de la temperatura de los láseres.

Para la conexión con el ordenador se utilizó un cable USB hembra-macho al que se le colocó un filtro de ferrita para evitar ruidos. La conexión con el ordenador se efectúa de la misma forma que las tarjetas de adquisición de datos, por la parte frontal y directamente.

## 8- Mediciones

En este capítulo se describirá el procedimiento para hacer las medidas describiendo las diferentes disposiciones de la cámara CCD y así como sus posibilidades de calibración y se presentarán algunos resultados obtenidos por el sistema diseñado. Posteriormente se explicarán y se mostrarán ensayos de fotoluminiscencia de obleas en transmisión y de células fotovoltaicas en reflexión y de electroluminiscencia de células utilizando transmisión.

La colocación de las obleas y célula se realizará tal y como se muestra en la Figura 8.1 de forma que queden en el espacio efectuado para ellas. En las medidas por fotoluminiscencia la intensidad que circula por los láseres está limitada a 25 A al fondo de escala por lo que para obtener esa corriente habrá que llevar el potenciómetro del al fondo de escala tal y como se explica en la Figura 8.X.

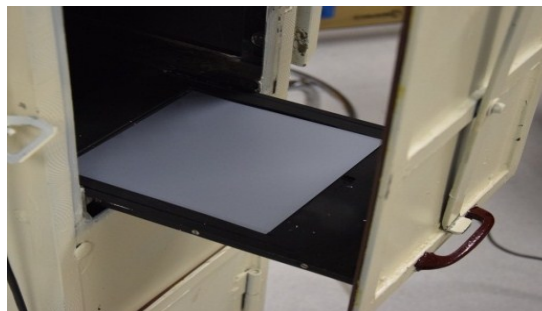


Figura 8.1.- Colocación de las obleas y células en el soporte.

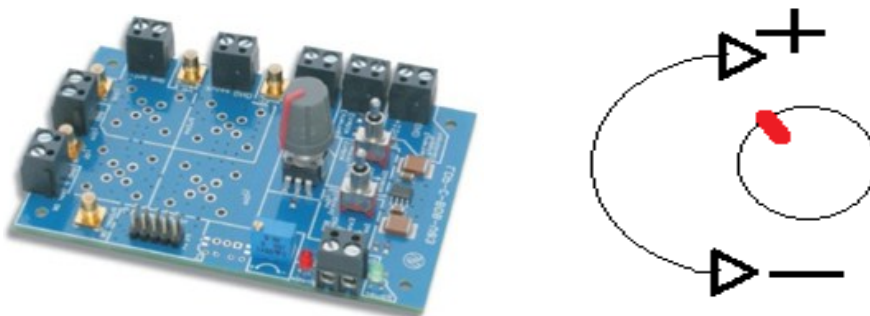


Figura 8.X.- Dispositivo BOB utilizado para variar la intensidad por los láseres (izquierda). Esquema del mando del potenciómetro, explicando el sentido de del aumento de la corriente; sentido horario aumenta, sentido antihorario disminuye (derecha).

Además para probar la estanqueidad del entorno de pruebas se realizaron dos ensayos de fotoluminiscencia en transmisión con las mismas características. Una de las medidas se realizó con la habitación en penumbra y la otra con todas las luces encendidas. En la Figura 8.2 se pueden ver ambas. Los resultados obtenidos demuestran que el entorno es lo suficientemente estanco.

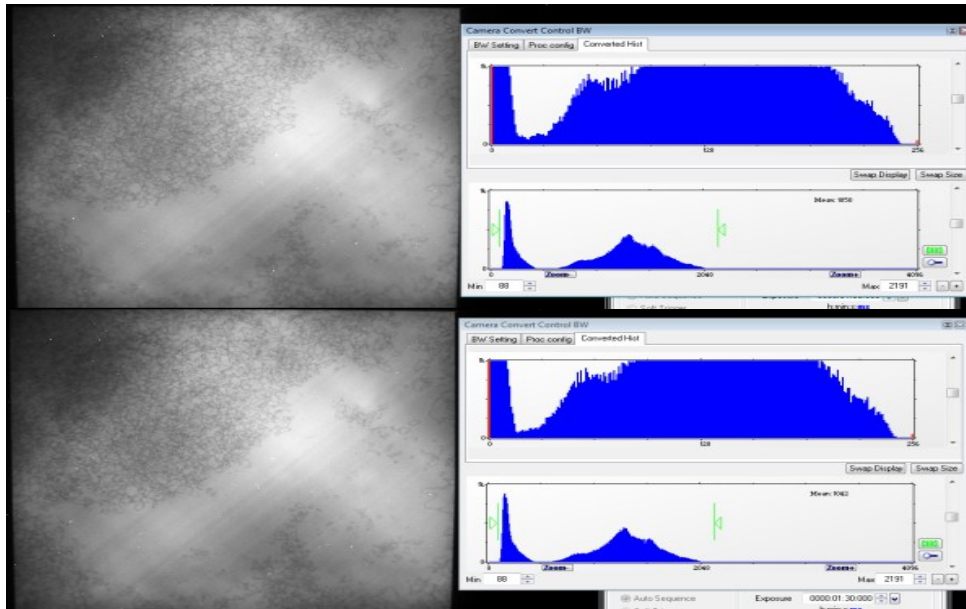


Figura 8.2.- Comprobación de la estanqueidad del entorno. Con luz (izquierda) y Sin luz (derecha).

#### - Calibración de la cámara CCD

En ambas disposiciones la cámara CCD tiene la posibilidad de desplazarse para poder enfocar la muestra de la mejor forma posible. Además de esta manera se podrán enfocar partes concretas de la muestra para un análisis más detallado de las mismas. El propio objetivo de la cámara permite abrir o cerrar la entrada de luz y el enfoque manual de la misma.

#### - Calibración en las medidas por Transmisión

En las medidas por transmisión la cámara se encuentra en posición vertical. Apoyada sobre una superficie acolchada rodeada por tres de sus lados de láminas metálicas para restringir su movimiento. El cuarto lado que no está cubierto por la lámina metálica es la parte posterior de la cámara, donde se realizan las conexiones. En la Figura 8.3 se puede ver la plataforma sobre la que está apoyada la cámara y el orificio efectuado en el acolchado para la salida del cableado.



**Figura 8.3.-** Plataforma de apoyo de la cámara CCD.

La plataforma está montada sobre un sistema elevador que permite a la cámara desplazarse en el eje vertical. El sistema elevador es el modelo LAB-ELE de la marca JP Selecta. Está fabricado en aluminio anodizado con una plataforma útil de 120 x 140 mm, un poder de elevación de 260 mm y un peso máximo soportable de 7 Kg. En la Figura 8.4 se puede ver una imagen del elevador con y sin soporte.



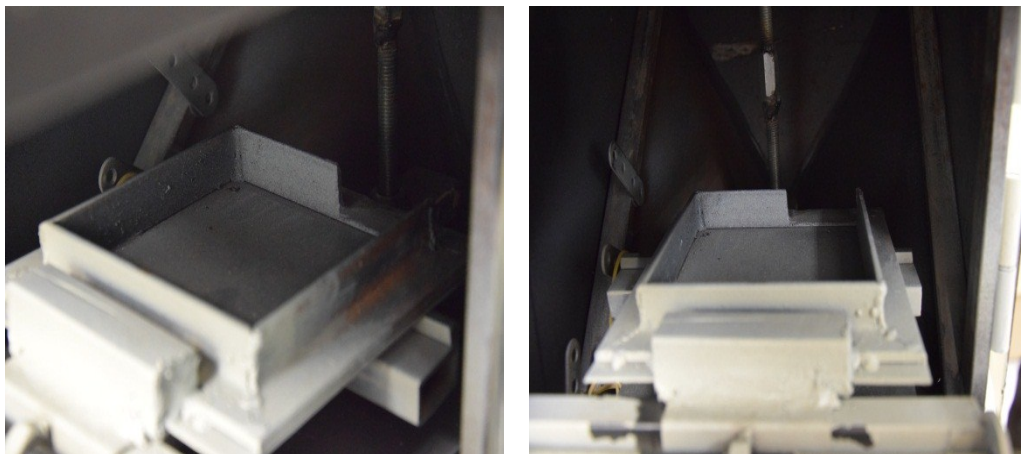
**Figura 8.4.-** Plataforma de la cámara unida al elevador. Señalado mediante un círculo amarillo está el imán utilizado para fijar la posición de la cámara (izquierda). Elevador LAB-ELE de JP Selecta utilizado.

La movilidad en el plano horizontal se consigue simplemente moviendo el elevador a la posición deseada. Para evitar que este se mueva y mantenerlo fijo en la posición deseada se ha utilizado un imán, el cual podemos ver en la Figura 8.4. La superficie sobre la que se apoya el sistema de movimiento vertical es de acero, por lo que al poner el imán encima este se verá atraído por dicha superficie y evitará que el elevador se mueva. Además como éste está fabricado en aluminio el imán se puede retirar fácilmente del elevador.

Para afianzar la cámara a la plataforma de manera que ésta esté más seguro se utilizarán gomas elásticas. Se optó por esta solución debido a su sencillez y a su efectividad. En la Figura 7.25 en la imagen de la izquierda.

- Calibración en las medidas por Reflexión

En la caracterización de células por reflexión la cámara estará colocada de forma horizontal sobre la plataforma que se encuentra en el interior de la estructura adicional, tal y como se puede ver en la Figura 7.26. A diferencia que en la disposición de medidas en transmisión en la que la plataforma sobre la que se apoyaba solo tenía cubiertos 3 de sus lados de láminas metálicas en reflexión se encuentran cubiertos los cuatro lados, por lo que la cámara encaja perfectamente y no tiene posibilidades de moverse. En la Figura 8.5 se puede ver la plataforma de apoyo de la cámara. En la lámina metálica de la parte posterior se ha efectuado un corte para la salida del cableado.



**Figura 8.5.-** Plataforma de apoyo de la cámara CCD vista desde un lateral (izquierda) y desde el frente (derecha). Se puede observar en ambas el corte efectuado a la lámina posterior para la salida del cableado.

El sistema de calibrado de esta plataforma es más complejo que el utilizado en la disposición de las medidas en transmisión. Aún así solamente permite

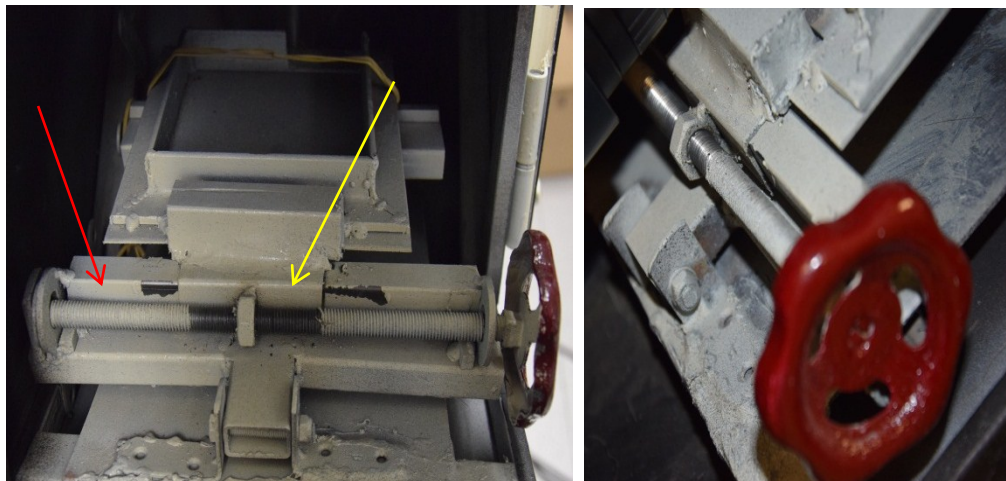


movimientos en un eje horizontal y el giro sobre otro. El movimiento sobre el eje horizontal solo permite a la cámara moverse hacia la derecha o la izquierda. No permite a la cámara alejarse o acercarse a la célula.

Para conseguir este movimiento la plataforma se encuentra soldada a un tubo estructural rectangular por la parte frontal y otro de menor sección soldado a modo de guía tal y como se puede ver en la Figura 8.6.

Para conseguir el movimiento la estructura está soldada a una tuerca atornillada a un tornillo sin fin que será el encargado de hacer moverse a la plataforma. A este tornillo se ha atornillado un mango de manera que sea más sencilla su calibración al no necesitar de ninguna herramienta.

Para poder centrar más la imagen, se ha dispuesto de un movimiento angular respecto a la sujeción de la parte frontal de la plataforma. Esta sujeción permite el movimiento angular de la plataforma respecto al eje horizontal de movimiento lateral. Esto permite ajustar mas la imagen que captará la cámara. En la Figura 8.7 se puede ver el sistema de sujeción.



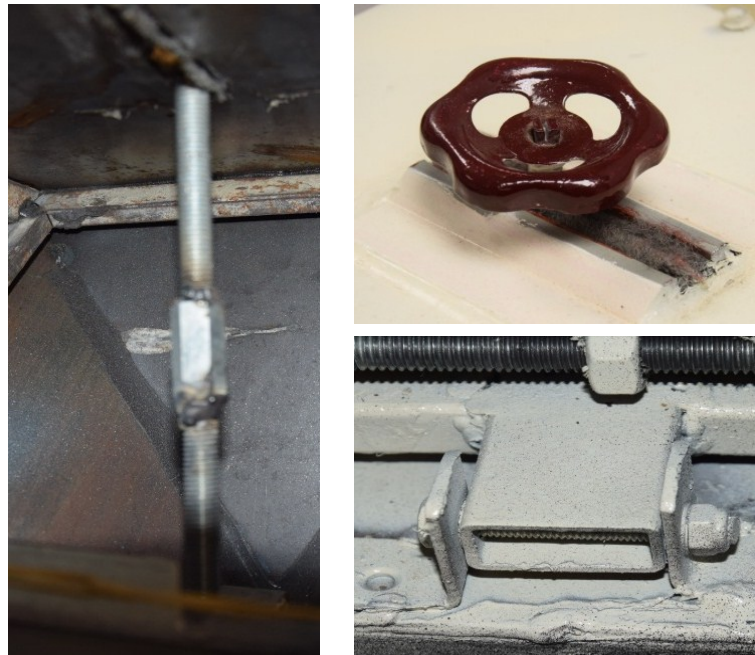
**Figura 8.6.-** Sistema de movimiento horizontal-lateral, en la imagen de la izquierda está sistema completo visto desde el frente, en ella se pueden apreciar los dos tubos estructurales que sirven de guías para el movimiento lateral. Señalado con una flecha roja el tubo interior y con una flecha amarilla el tubo soldado a la plataforma. En la imagen de la derecha se puede apreciar el mango utilizado y se ve el tornillo sin fin utilizado para el movimiento. La imagen esta efectuada desde el lateral de la estructura.

Para conseguir ese movimiento angular se utilizó una tuerca soldada por la parte posterior de la plataforma y un tornillo sin fin de forma que este fuese roscado por dicha tuerca. Este tornillo sin fin apoya sin estar fijo sobre la propia chapa de la estructura adicional de manera que pueda girar. Por la parte exterior se ha atornillado un mango para facilitar su manejo y se ha

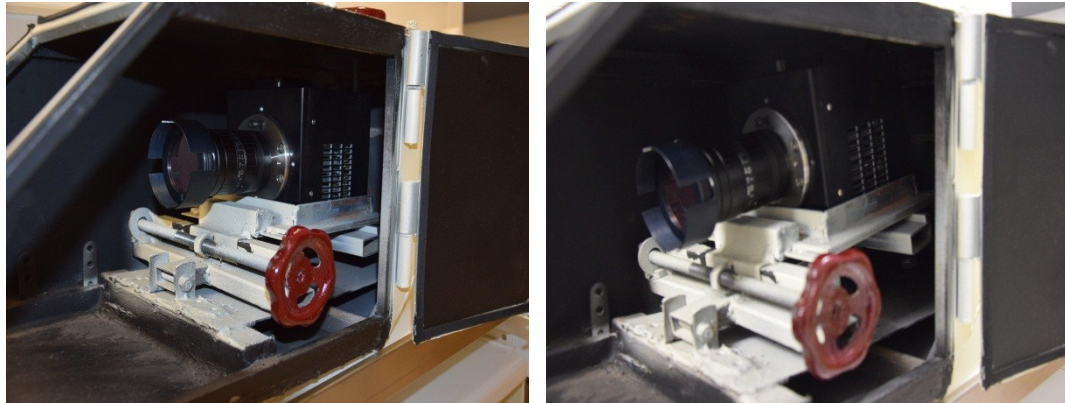
dispuesto de cerramiento compuesto por una junta con “pelillos” para impedir la entrada de luz exterior pero permitir el movimiento. En la Figura 8.7 se puede ver el sistema.

Se utilizó este sistema de cerramiento ya que a medida que la plataforma se desplaza angularmente el tornillo sin fin lo hace se desplaza también. Por lo que hay que dejarle un pequeño espacio al tornillo para que se mueva.

Este sistema permite variar el ángulo de incidencia de la cámara tal como se puede ver en la Figura 8.8. Este ángulo está restringido por la propia cámara, ya que la cámara puede golpear con la parte superior en la chapa. Por tanto hay que tener cuidado a la hora de manipularlo. Otra precaución que hay que tomar es la de no forzar en ningún momento los sistemas de calibración de esta disposición y en especial el de movimiento angular, ya que las soldaduras efectuadas tienen poca superficie.



**Figura 8.7.-** Tornillo sin fin utilizado para el movimiento angular, está formado para la unión de dos varillas roscadas y apoya por la parte inferior (izquierda). Mango utilizado para variar el ángulo de incidencia de la cámara. Además se puede observar el cerramiento efectuado mediante las juntas de “pelillos” (arriba-derecha). Apoyo de la plataforma por la parte frontal que permite el movimiento angular (abajo-derecha).



**Figura 8.8.-** Menor ángulo de incidencia posible de la cámara (izquierda). Mayor ángulo posible de la cámara sin que chope con la parte superior (derecha).

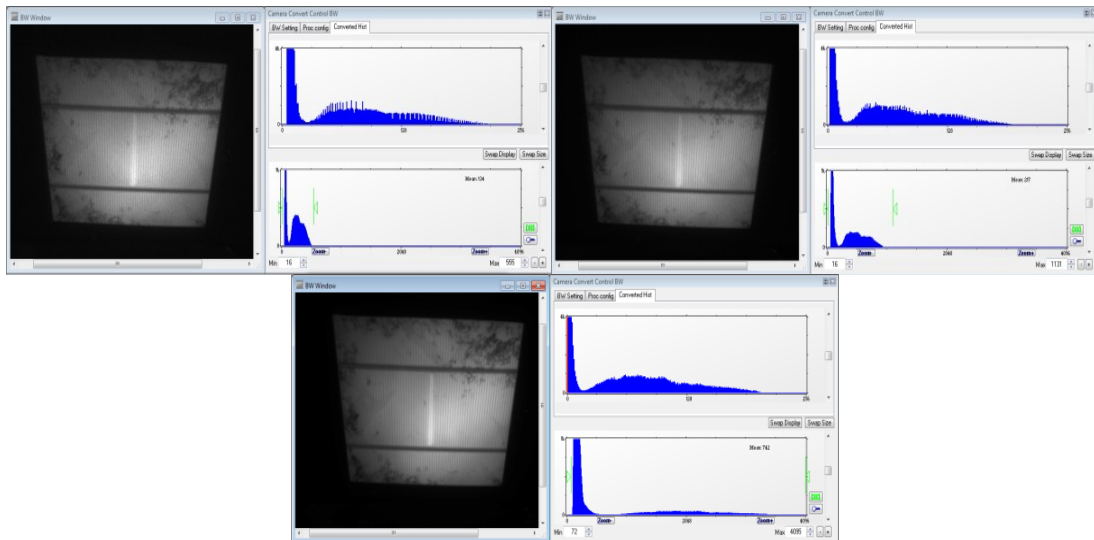
#### - Ensayos con células fotovoltaicas

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos analizando células fotovoltaicas mediante el sistema creado. Las células fotovoltaicas a diferencia de las obleas no tienen efectuada la unión P-N por lo que no se les podrá efectuar medidas por electroluminiscencia. Además se realizarán ensayos tanto en reflexión como en transmisión (transmisión solamente será posible para medidas por electroluminiscencia) y se comprarán los resultados. Se aportarán las imágenes obtenidas así como los parámetros utilizados para su obtención, pero no se efectuará un análisis minucioso de ellas.

#### - Ensayo de fotoluminiscencia

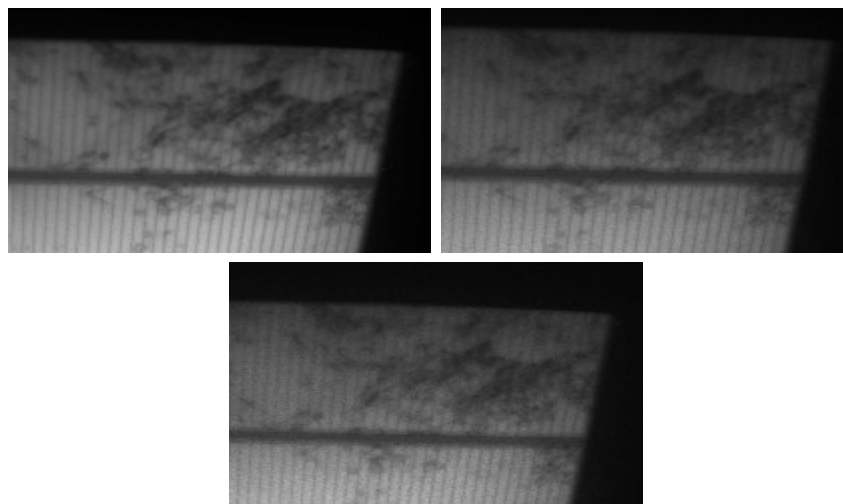
En este ensayo se utilizará como fuente de excitación los láseres instalados en la parte superior. Se realizarán pruebas en reflexión con varias células diferentes. Además se utilizarán tiempos de exposición diferentes para comparar los resultados.

En la Figura 8.9 se puede ver el ensayo de la célula que se denominará “célula A” para los tiempos de exposición de 0.5, 1 y 5 segundos, con el histograma de intensidades lumínicas/píxeles anexo a las imágenes.



**Figura 8.9.-** Ensayos de la misma célula con diferentes tiempos de exposición. 0.5 segundo (arriba-izquierda). 1 segundo (arriba-derecha). 5 segundos (abajo).

Como se puede observar a medida que se aumenta el tiempo de exposición aparece en el histograma un rango más expandido de valores, por lo que aumenta la resolución, en la Figura 8.10 se puede comprobar este aumento de resolución. El pico de intensidad que presenta el histograma al principio es parte del reflejo de los láseres, pero se puede mitigar escogiendo un rango de muestreo en el que no aparezca.



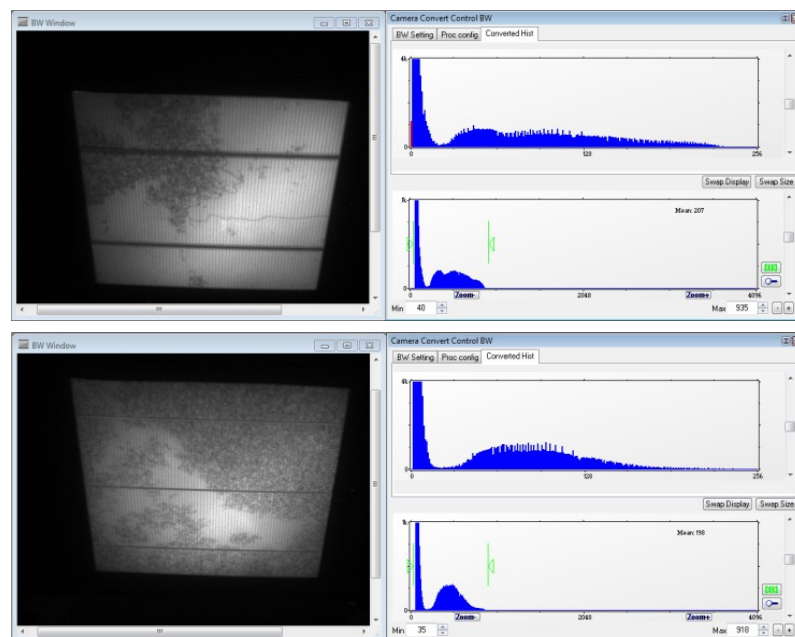
**Figura 8.10.-** En el mismo ensayo que en la Figura 8.9 se ha efectuado el zoom a una de las partes. Se puede observar que la imagen de la izquierda, con un tiempo de exposición de 5 segundos tiene más resolución que la del centro-abajo con un tiempo de exposición de 1 segundo y que ésta, una resolución parecida la de la derecha de 0.5 segundos, ya que la diferencia entre ambas no están grande como con la de 5 segundos.



En la Figura 8.11 se ha efectuado el ensayo de otras 2 células diferentes, la primera se denominará “célula B” y la segunda a la que se denominará “célula C”.

El tiempo de exposición para ambas ha sido de 1 segundo. Comparando ambas la célula C tiene más zonas oscuras que corresponden a zonas con una gran acumulación de defectos que disminuyen la recombinación intrínseca. Debido a las limitaciones de la cámara no podemos determinar el tipo de defecto, simplemente saber que existe.

La células A y B son de la misma partida de fabricación, en cambio la célula C es de otra totalmente distinta. En la Figura 8.12 se pueden observar las diferencias entre las tres muestras.



**Figura 8.11.-** Ensayos con la célula B (arriba) y la célula C (abajo) con un tiempo de exposición de 1 segundo para ambas. Se puede observar que la célula B posee menos defectos.

- Ensayo de electroluminiscencia

Para efectuar este ensayo se dispondrá de un vidrio de forma que ocupe el lugar donde debería ir la oblea o la célula. La disposición utilizada para realizar este tipo de ensayo puede ser tanto en reflexión como en transmisión ya que no se utilizará como fuente de excitación a los láseres. La excitación se efectuará utilizando una fuente de alimentación. En la propia célula se efectuarán los siguientes contactos, que se pueden ver en la Figura 8.13. La conexión de la célula se tendrá que hacer en directa, tal y como se puede ver también en la Figura 8.13.





# PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

Universidad de Valladolid

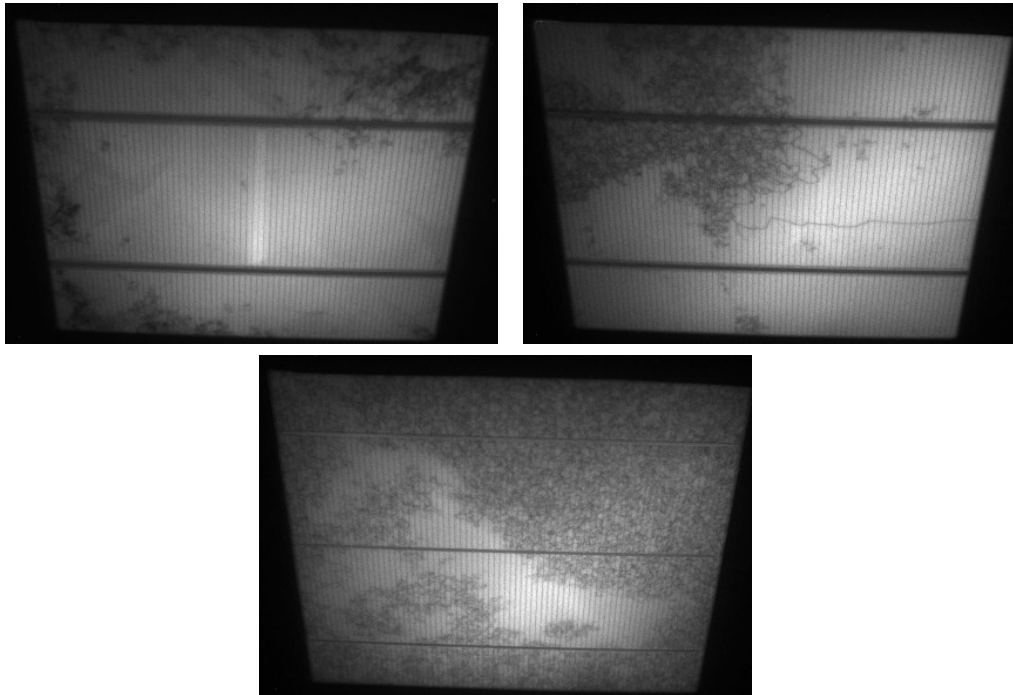


Figura 8.12.- Ensayos en reflexión con tiempos de exposición de 1 segundo para cada muestra. Célula A (arriba-izquierda), célula B (arriba-derecha) y célula C (abajo).

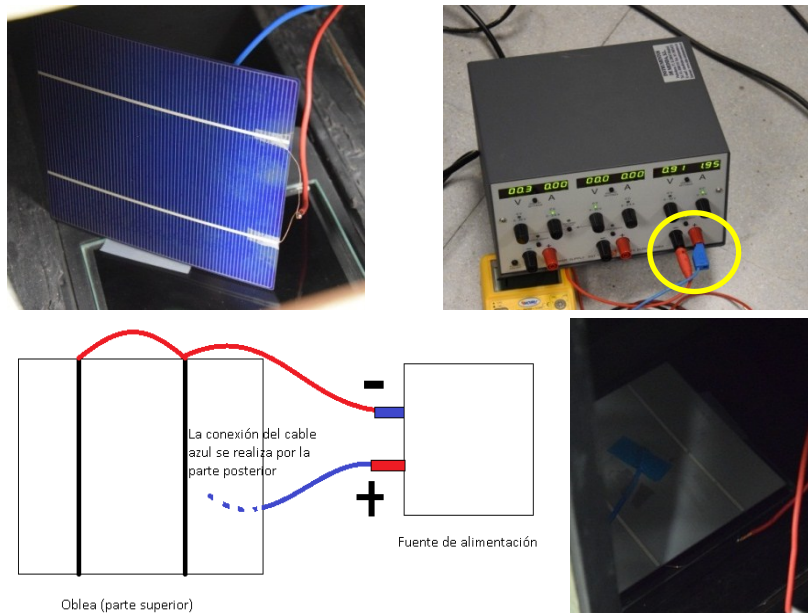
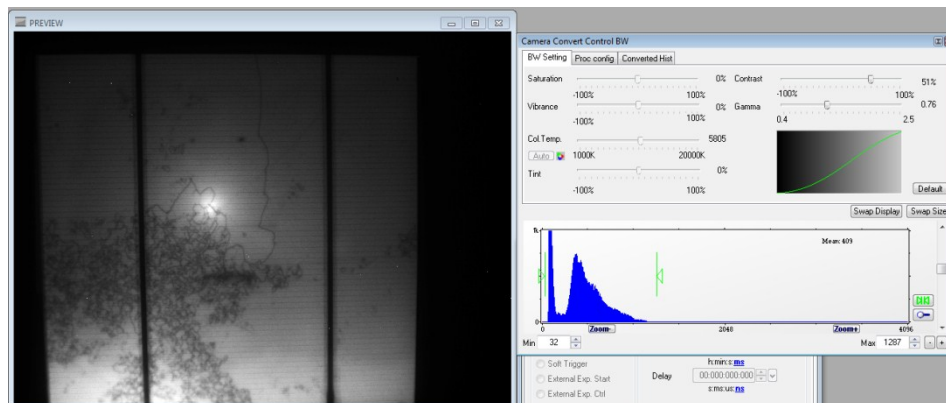


Figura 8.13.- Conexiones realizadas sobre la célula a la cual se efectuó el ensayo mediante electroluminiscencia (arriba-izquierda). Fuente de alimentación utilizada en la que se señalan las conexiones realizadas, polarizando la célula en directa (arriba-derecha). Esquema de la conexión realizada (abajo-izquierda). Colocación de la célula de forma que sea medida por la disposición en transmisión (abajo-derecha).

Una vez realizados los contactos, que es la parte más delicada de la operación se efectúa a realizar la captura de la imagen. En la Figura 8.13 se puede ver que la corriente que circula por la célula a la hora de realizar la captura es de 1.95 A. La captura de esta imagen se realizó utilizando la disposición en para medidas en transmisión, por lo que la célula se colocó hacia abajo, tal y como se ve en la Figura 8.13. La imagen obtenida es la que aparece en la Figura 8.14 utilizando un tiempo de exposición de 10 segundos.



**Figura 8.14.-** Ensayo efectuado mediante electroluminiscencia con un tiempo de exposición de 10 segundos.

#### - Ensayos con obleas de silicio

En este apartado se expondrán algunos de los resultados obtenidos analizando obleas de silicio, tanto policristalino como monocristalino utilizando el dispositivo creado. Los resultados no se analizarán minuciosamente, simplemente se expondrán las imágenes capturadas, aportando los parámetros utilizados para su obtención y se comentarán por encima.

Para la realización de estas medidas se utilizará la disposición por transmisión usando los láseres como fuente de excitación de los pares electrón-hueco. Además se utilizarán tiempos de exposición diferentes para mostrar las diferencias de cada uno de ellos. Estos tiempos de exposición son mayores que los de reflexión debido a que en esta disposición las emisiones de luminiscencia son menores.

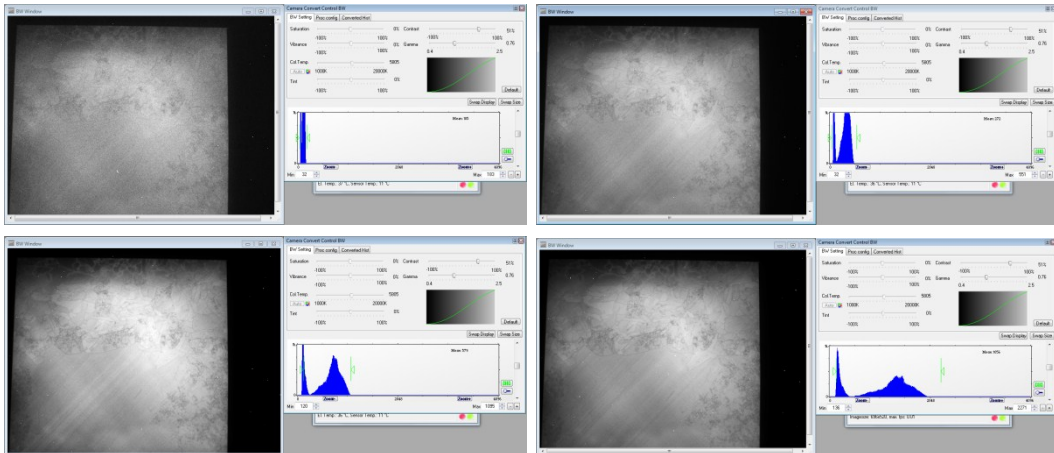
En la Figura 8.15 se ve el ensayo de la oblea que a la que nos referiremos como “híbrida” a partir de ahora, esta oblea está constituida en un 50% de silicio policristalino y otro 50% de silicio monocristalino. Los tiempos de exposición utilizados de 5, 20, 45 y 90 segundos, con el histograma de intensidades lumínicas/píxeles anexo a las imágenes.



## PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA

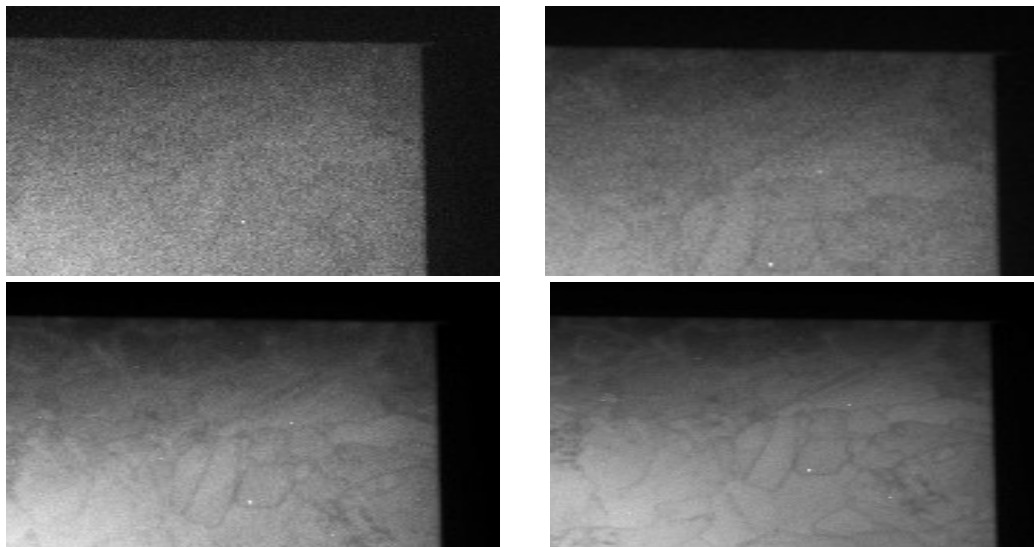
Universidad de Valladolid

Al aumentar los tiempos de exposición el rango valores del histograma intensidad/píxeles aumenta, disminuyendo en intensidad. Esto mismo sucede con las medidas en reflexión, pero en reflexión el rango de valores aumenta de forma mucho más significativa al aumentar el tiempo de exposición. Esto es debido como ya se comentó anteriormente a la mayor emisión de luminiscencia en las medidas por reflexión. Aun así la nitidez de las imágenes aumenta considerablemente cuando aumentamos el tiempo de exposición.



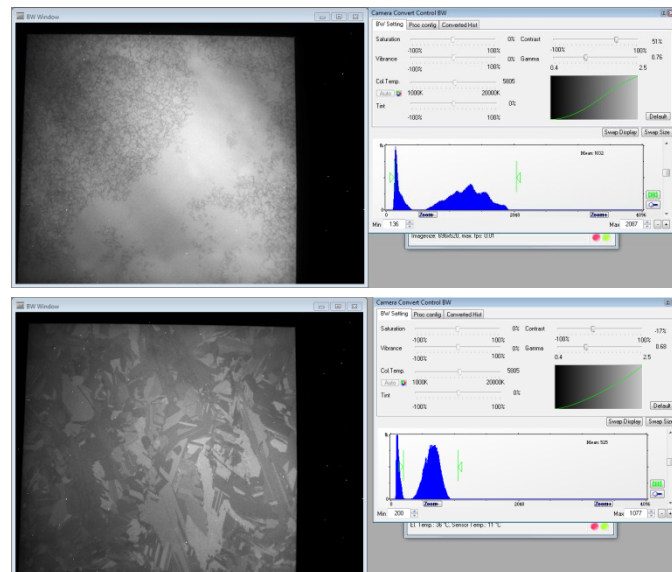
**Figura 8.15.-** Ensayos de la oblea híbrida para diferentes tiempos de exposición, 5 segundos (arriba-izquierda), 20 segundos (arriba-derecha), 45 segundos (abajo-izquierda) y 90 segundos (abajo-derecha)

Al igual que con transmisión los picos de intensidades altos se pueden mitigar modificando el rango de adquisición en el propio software. En la Figura 8.16 se puede observar el aumento de la nitidez de igual manera que sucede con las células en la Figura 8.10.



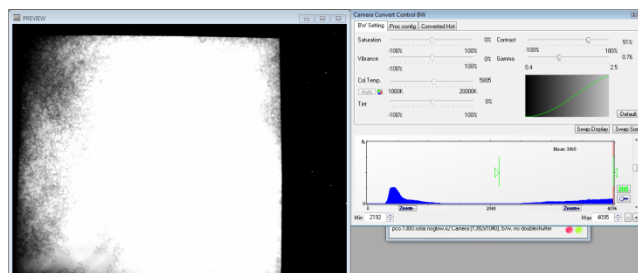
**Figura 8.16.-** En el mismo ensayo que en la Figura 8.15 se ha efectuado el zoom a una de las partes. Se puede observar la mejora paulatina de la nitidez desde los tiempos de exposición de 5 segundos (arriba-izquierda), 20 segundos (arriba-derecha), 45 segundos (abajo-izquierda) y 90 segundos (abajo-derecha).

La parte a la que se le ha efectuado el zoom corresponde a una zona de silicio policristalino. En la Figura 8.15 se pueden ver otros dos ensayos efectuados con el mismo método. La oblea que a la que nos referiremos como “Poli” está constituida al 100% por silicio policristalino y la oblea a la que nos referiremos como “Mono” está constituida al 100% por silicio monocristalino. Estos ensayos se han efectuado con tiempos de exposición de 90 segundos para ambas ya que es el tiempo de exposición normalmente usado en este tipo de medidas.



**Figura 8.17.-** Ensayos con la oblea Mono (arriba) y la oblea Poli (abajo) con un tiempo de exposición de 90 segundos para ambas. Se puede apreciar claramente las distintas estructuras de cada una.

Los tiempos de exposición hay que ajustarlos de manera que entren en un rango aceptable. Ya que un tiempo de exposición demasiado elevado podría provocar que la imagen quedase sobreexpuesta y lo único que se vería sería una imagen blanca ya que la cámara tiene limitaciones. En la Figura 8.18 se puede observar un ensayo con un tiempo de exposición de 300 segundos utilizando como muestra la oblea Mono.



**Figura 8.18.-** Ensayo con la oblea Mono, en la que el tiempo de exposición fue demasiado elevado. Se puede ver que el rango de valores del histograma se sale del propio histograma y no existe la posibilidad de aislar esas intensidades tan grandes.



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

-





## Conclusiones

Una vez realizados los ensayos mediante los sistemas de caracterización por electroluminiscencia y fotoluminiscencia y comprobado que los resultados cumplen la expectativas se puede decir que el objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado ha sido realizado con éxito.

Se han mejorado todos los aspectos en los que el prototipo inicial fallaba:

- El entorno de medidas es totalmente estanco a la luz exterior, por lo que las imágenes obtenidas no recurren a errores ni falseamiento de las mismas.
- El sistema de colocación de las obleas y células fotovoltaicas facilita el cambio de las muestras ya que no hay que estar posicionando manualmente cada muestra de forma que quedase en la misma posición que las demás.
- La estructura es más robusta. La estructura de aglomerado de madera del prototipo estaba unida mediante tirafondos y debido a los cambios de posición del sistema éstos estaban flojos.
- Las posibilidades de calibración del sistema elaborado permiten una mayor posibilidad de posiciones y precisión que el prototipo inicial.
- Se ha instalado un sistema de automatización de las medidas que el prototipo inicial no tenía.
- El cableado de todo el sistema se ha cambiado de forma que resulte mucho más sencilla su identificación y se han cambiado las secciones críticas para reducir su calentamiento. Además el cableado se ha conducido mediante canaletas de forma que no haya cables colgando.
- Aumentar las medidas de seguridad de los láseres, midiendo su temperatura para evitar que éstos alcancen temperaturas que reduzcan drásticamente su vida útil.

Por todas las razones expuestas se puede afirmar que los objetivos de este Trabajo Fin de Grado se han cumplido de forma muy satisfactoria.



**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**

**Universidad de Valladolid**

Aunque los objetivos de este Trabajo Fin de Grado se hayan cumplido, existen aspectos de mejora dentro del mismo. Aspectos como:

- La instalación de un sistema de calibrado de los láseres movido mediante servomotores utilizando guías lisas como las utilizadas en los sistemas de impresión 3D.
- Desarrollo del software específico para la automatización del proceso de medida.
- La utilización de lentes de difuminación de los haces de láser para obtener una excitación más homogénea.
- Instalación de una consola desde la que poder realizar las medidas sin la necesidad de un ordenador exterior al sistema.
- Duplicar el cableado de alimentación y de conexión con el ordenador de la cámara CCD para hacer más sencillo el cambio de una disposición a otra.



## Bibliografía

- 1- A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering Segunda Edición*, John Wiley and Sons (2011).
- 2- J. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, New York, Dover Publications, (1971).
- 3- R.F.Pierret, *Advanced Semiconductor Fundamentals, Vol. VI*, Modular Series on Solid State Devices, Addison Wesley (1989).
- 4- A. Goetzerberger, J. Knobloch and B. Voss, *Crystalline Silicon Solar Cells*, JohnWiley and Sons. (1998),
- 5- Benito Moralejo. *Desarrollo y optimización de sistemas de Corrientes inducidas ópticamente y de imágenes de luminiscencia para la caracterización de células fotovoltaicas*. (2014).



**Universidad de Valladolid**

**PUESTA EN PRÁCTICA Y ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS  
MEDIANTE ELECTRO Y FOTOLUMINISCENCIA**