



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial Y Desarrollo del Producto

**Desarrollo de una estructura portable para el control
de calidad de los módulos en plantas solares**

Autor:

Vicario Bueno, Ángela

Tutores:

Martínez Sacristán, Oscar

González Rebollo, Miguel Ángel

Dpto. Física de la Materia Condensada

Valladolid, Junio de 2018

AGRADECIMIENTOS

Quisiera aportar mis mejores agradecimientos a todas las personas que lo han hecho posible. En primer lugar, a mi familia, porque sin ellos no habría sido capaz de llegar hasta aquí; gracias por la educación que me habéis brindado, y por todo el apoyo aportado durante esta.

A las personas cercanas, amigos y resto de familiares que me han ayudado y me han dado la confianza para conseguir desarrollar el siguiente proyecto.

A Miguel Ángel González Rebollo y a Oscar Martínez Sacristán, tutores de mi TFG. Por ofrecerme sus mejores aportaciones y correcciones, así como guiarme en la dirección correcta.

A Luis Alberto Sánchez, ayudante del Laboratorio de Física Aplicada, por su interés y ayudarme en la realización del proyecto de forma desinteresada.

Y, por último, a todas aquellas personas que han mostrado su apoyo y entusiasmo hacia este proyecto.

ÍNDICE

I. MEMORIA

1. RESUMEN.....	11
1.1 RESUMEN.....	11
1.2 PALABRAS CLAVE.....	11
2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	13
2.1 INTRODUCCION.....	15
2.2 OBJETIVOS	16
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	17
3.1 ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	19
3.2 CÉLULAS SOLARES.....	20
3.2.1 INTRODUCCION A LAS CÉLULAS SOLARES	20
3.2.2 FUNCIONAMIENTO FÍSICO DE UNA CÉLULA SOLAR.....	20
3.2.3 ESTRUCTURA DE UNA CÉLULA SOLAR	24
3.2.4 PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE UNA CÉLULA SOLAR	25
3.2.5 FABRICACIÓN DE UNA CÉLULA SOLAR	26
3.3 SISTEMA LIGHT BEAM INDUCED CURRENT (LBIC).....	28
3.3.1 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	30
3.3.2 MONTAJE FÍSICO	30
3.3.3 COMPONENTES DE SOFTWARE	39
3.3.3.1 SOFTWARE DE CONTROL.....	40
3.4 TOMA DE MEDIDAS	41
4. EQUIPO EXISTENTE	43
4.1 CARACTERÍSTICAS	45
4.2 COMPONENTES.....	46
4.3 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.....	47
4.4 MEJORAS EN EL EQUIPO ANTERIOR.....	48
4.4.1 ZONAS DEL EQUIPO CUBIERTAS.....	48
4.4.2 ACCESO AL INTERIOR DEL EQUIPO	49
4.4.3 AISLAMIENTO LUMÍNICO	50
4.4.4 ADAPTACION A LA FORMA DEL EQUIPO	51
4.4.5 ENTRADA DE CABLES	52
4.4.6 MONTAJE.....	53
4.4.7 MESA DE APOYO.....	54

5. EQUIPO NUEVO	57
5.1 ESTUDIO DE MERCADO	59
5.2 SOLUCIONES ALTERNATIVAS.....	61
5.2.1 BOCETOS	61
5.2.2 MODELOS 3D.....	62
5.3 CARACTERISTICAS	63
5.4 COMPONENTES.....	65
5.4.1 PERFILES METALICOS	65
5.4.2 CERRAMIENTOS.....	66
5.5 ACCESORIOS	68
5.5.1 PUERTAS.....	68
5.5.2 BISAGRAS	71
5.5.3 ASAS	71
5.5.4 PIES ARTICULADOS	72
5.5.5 PASAMUROS	73
5.5.6 MESA OPTICA.....	74
5.6 PROCESO DE FABRICACIÓN.....	74
5.6.1 MECANIZADO	75
5.6.2 MONTAJE.....	76
6. CONCLUSIONES	79
7. REFERENCIAS	83
II. ANEJOS	
ANEJO 1. PLANOS.....	93
ANEJO 2. PRESUPUESTO	108
ANEJO 3. PLIEGO DE CONDICIONES.....	111

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.- Célula solar (izquierda) y planta de producción de energía fotovoltaica (derecha).....	20
Figura 2.- Enlaces entre átomos de Silicio y estructura cristalina del silicio.....	21
Figura 3.- efecto de impureza en red cristalina de Silicio.....	22
Figura 4.- Unión p-n y campo eléctrico creado debido a la zona de vaciamiento de carga.....	22
Figura 5.- Procesos sufridos por los electrones y huecos en los mecanismos de absorción, relajación y recombinación.....	23
Figura 6.- Principio de funcionamiento de una célula solar (efecto fotovoltaico).....	24
Figura 7.- Estructura básica de una célula solar.....	24
Figura 8.- Curvas I-V de una célula en oscuridad (azul) y en iluminación (negro).....	25
Figura 9.- Proceso de fabricación de una célula a partir de silicio monocristalino y multicristalino.....	27
Figura 10.- Etapas de fabricación de una célula solar de Si.....	27
Figura 11.- Esquema simple de una medida LBIC.....	29
Figura 12.- Configuraciones básicas y resultados de la señal para la técnica LBIC.....	30
Figura 13.- Esquema del sistema de medida LBIC.	31
Figura 14.- Imagen de una de las cabezas de los dispositivos laser duales con su fuente de alimentación.....	32
Figura 15.- Electrometro <i>Keithley</i> modelo 6514 utilizado para la medida de fotocorriente generada en los materiales fotosensibles en estudio.....	33
Figura 16.- Controlador <i>ProScan II</i> de la mesa (izquierda), mesa motorizada <i>H101</i> (centro) y joystick (derecha) que componen el sistema de posicionamiento.....	33
Figura 17.- Tarjetas de adquisicion de datos externa, imagen y características del modelo.....	34
Figura 18.- Fuente de alimentacion programable externa utilizada para el funcionamiento de circuitos integrados y en los barridos de voltaje en las medidas I-V.....	36
Figura 19.- Encapsulado en el que se comercializa el diodo PIN utilizado como fotosensor.....	36
Figura 20.- Imagen del amplificador y del fotosensor.....	37
Figura 21.- Imagen de la cámara.....	37
Figura 22.- Esquema del sistema de alineamiento.....	39
Figura 23.- Captura de pantalla de la ventana de inicio del software de medida.....	40
Figura 24- Captura de pantalla de la ventana de selección del dispositivo que se desea configurar o testear.....	41

Figura 25.- Captura de pantalla de la ventana de configuración de la medida LBIC....	42
Figura 26.- Vista del equipo completo.....	46
Figura 27.- Equipo antiguo en 2 vistas diferentes.....	47
Figura 28.- Zona donde se ubican los láseres y espejos.....	48
Figura 29.- Unión de las piezas de la estructura de recubrimiento mediante cinta y confuso paso de los cables.....	50
Figura 30.- Estructura antigua con la parte del microscopio que queda en el exterior.	51
Figura 31.- Salida de cables del equipo de forma compleja.....	52
Figura 32.- Pasamuros para un conjunto de 10 cables.....	53
Figura 33.- Ensamble entre panel y perfil (izquierda) y sección del perfil (derecha)....	54
Figura 34.- Mesa convencional utilizada en el equipo anterior.....	55
Figura 35.- Cerramiento de seguridad.....	56
Figura 36.- Protecciones de maquinaria	59
Figura 37.- Bastidores de máquinas.....	60
Figura 38.- Plataformas y superficies de trabajo.....	60
Figura 39.- Carros de apoyo.....	60
Figura 40.- Boceto 1.....	61
Figura 41.- Boceto 2.....	61
Figura 42.- Boceto 3.....	62
Figura 43.- Imagen del primer diseño de la estructura.....	62
Figura 44.- Vistas principales de la nueva estructura completa.....	64
Figura 45.- Sección de los perfiles de la estructura.....	65
Figura 46.- Conjunto de la estructura formada por perfiles ranurados.....	65
Figura 47.- Unión entre perfiles.....	66
Figura 48.- Conjunto de paneles.....	67
Figura 49.- Panel y goma de unión en la zona del microscopio.....	67
Figura 50.- Apertura del conjunto de puertas.....	68
Figura 51.- Puerta lateral (izquierda) y frontal (derecha) abiertas.....	69
Figura 52.- Apertura de las dos puertas.....	69
Figura 53.- Apertura puerta en "L"	70
Figura 54.- Apertura simultánea de las puertas en "L"	70
Figura 55.- Bisagra de acero inoxidable 30.30 (Motedis).....	71
Figura 56.- Bisagras incluidas en el equipo.....	71
Figura 57.- Tornillos avellanados de métrica 6 (Motedis).....	71
Figura 58.- Asa 122 (Motedis).....	72
Figura 59.- Asas incorporadas en la estructura.....	72

Figura 60.- Pie articulado 60 varilla roscada M12x88 (Motedis)	73
Figura 61.- Pies articulados unidos a los perfiles de la mesa.....	73
Figura 62.- Pasamuros.....	73
Figura 63.- Mesa óptica NewPort M-PG-23-4-ML.....	74
Figura 64.- Ubicación de la mesa optica dentro de la estructura.....	74
Figura 65.- Sierra de corte para los perfiles de aluminio.....	75
Figura 66.- Sierra vertical de panel.....	75
Figura 67.- Metodo de union de perfiles.....	76
Figura 68.- Unión perfil y panel junto con la pieza de goma.....	76
Figura 69.- Panel y perfil unidos junto con la pieza de goma.....	77
Figura 70.- Bisagra atornillada al perfil de aluminio.....	77

I. MEMORIA

1. RESUMEN

1.1 RESUMEN

El proyecto se centra en el diseño y desarrollo de una estructura mejorada para el control de calidad de los módulos en plantas solares. Se trata de una cubierta para un sistema de medida LBIC (Light Beam Induced Current) y un sistema de medida de fotoluminiscencia de oblea completa para la caracterización espacial de obleas de silicio y células solares, en especial de silicio multicristalino.

En este Trabajo de Fin de Grado se presenta el diseño de una nueva estructura portable que sustituye a la anterior y se exponen las modificaciones realizadas. Resulta muy útil disponer de una estructura que proteja el equipo y facilitará el correcto funcionamiento del mismo, ya que un requisito principal es el aislamiento lumínico. También facilitará introducir y extraer la célula solar del interior del equipo y el acceso completo al sistema.

1.2 PALABRAS CLAVE

Célula solar, oblea de silicio, LBIC, fotoluminiscencia, silicio multicristalino.

2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

2.1 INTRODUCCION

El desarrollo de un sistema de medida LBIC (*Light Beam Induced Current*) y un sistema de medida de imágenes de fotoluminiscencia de oblea completa (*Photoluminescence Imaging, PLi*) se diseñó para la caracterización de dispositivos de silicio fotovoltaico, identificando los defectos en su mayoría responsables de la pérdida de rendimiento de los dispositivos.

Para la caracterización de los diferentes materiales y del silicio convencional, se han construido dos sistemas de caracterización basados en la creación y la captación de imágenes que representan el comportamiento cualitativo del material fotovoltaico. Este es el caso de la técnica de corriente inducida por medio de un haz de luz (*Light Beam Induced Current, LBIC*) y la técnica de obtención de imágenes de fotoluminiscencia a oblea completa (*Photoluminescence Imaging, PLi*).

El sistema LBIC permitirá realizar un análisis de la uniformidad eléctrica de los materiales fotosensibles, con el propósito de poder detectar los defectos extendidos existentes en materiales semiconductores para aplicaciones fotovoltaicas. Esta técnica se basa en la creación de mapas cartográficos, compuestos por el conjunto de medidas de intensidad de fotocorriente puntual en cortocircuito. Esta corriente será generada en la célula cuando se hace incidir sobre ella un haz de luz monocromática, dando así lugar a la generación de pares electrón-hueco. La unión p-n existente en las células ayudará a la separación de cargas favoreciendo la conducción de la corriente eléctrica generada hacia un circuito de medida externo. De esta manera, se podrán detectar zonas eléctricamente activas e ineficientes para la conversión fotovoltaica, proporcionando indicaciones sobre la bondad o no de los procesos de crecimiento y fabricación de las obleas fotovoltaicas. Se pretende poder aplicar esta técnica no sólo en células solares comerciales, sino también en obleas de silicio que es material de partida para la fabricación de células solares, por medio de la preparación de uniones Schottky. Además de la fotocorriente, el sistema será capaz de realizar medidas de corriente frente a voltaje, medidas de reconstrucción de superficie según como ésta refleje la luz incidente y la recreación de la rugosidad de la superficie de la muestra a partir de la implementación del algoritmo de autoenfoco que ha sido desarrollado.

La fotoluminiscencia aplicada a oblea completa es una técnica que está ganando una gran importancia en el sector solar fotovoltaico gracias a que permite una rápida detección de defectos, tanto en obleas como en células solares de silicio, causantes de pérdidas de rendimiento. Es capaz de caracterizar áreas tan grandes como las de una célula solar en una única adquisición y en tiempos menores a un segundo, motivo por el que no será utilizada solamente en laboratorios de investigación.

El principio de esta técnica se basa en la captura de la emisión de luz resultado de la recombinación radiativa de electrones y huecos en un material aislante o semiconductor. La intensidad de luminiscencia del silicio es muy pobre ya que es un material de gap indirecto, por lo que para crear una emisión de fotoluminiscencia suficientemente medible, se requiere de una fuerte potencia de luz de excitación que genere una considerable cantidad de pares electrón-hueco. La luminiscencia emitida debe pasar a través de una serie de filtros ópticos que permitan eliminar la luz ambiente y la luz reflejada del láser de excitación, para

que finalmente sea la emisión de fotoluminiscencia la que sea captada por el sensor CCD de la cámara. Este tipo de medidas también servirán para identificar aquellas zonas de la oblea o célula solar que, debido a la presencia de impurezas o defectos en el cristal, influyen negativamente en la conversión fotovoltaica.

Las medidas de caracterización LBIC se han llevado a cabo tanto sobre obleas *as-cut*, como en células solares. Se han realizado estudios de eficiencias cuánticas y longitudes de difusión de portadores minoritarios, prestando especial atención a la importancia de la medida de la luz reflejada para su cálculo y utilizando la capacidad del sistema de obtener imágenes de alta resolución. También se ha estudiado el efecto de las fronteras de grano en materiales multicristalinos, así como la actividad eléctrica de los defectos intragrano. Se han obtenido mapas LBIC de dispositivos basados en silicio de distinta pureza y se ha estudiado el efecto de los defectos en el corte en las obleas cuando son convertidas a células comerciales. El sistema PLi desarrollado se ha utilizado para la rápida caracterización de obleas y células solares de silicio. Por medio de esta técnica se ha propuesto un método de clasificación de dispositivos fotovoltaicos a través de su emisión de luminiscencia global.

En último lugar, se han llevado a cabo un análisis combinado por medio de las técnicas disponibles en el laboratorio, señalando los puntos clave de cada una de ellas y probando su utilidad para la caracterización de material fotovoltaico.

Una vez fabricado el sistema de medida LBIC, se aisló lumínicamente creando una cubierta adaptada al equipo, y con esto queda finalizado el sistema.

Después de un uso continuo del equipo, dicha cubierta queda obsoleta, ya que no se realizó un diseño previo de la misma y no se realizó un estudio previo para llevarlo a cabo, por lo que habría que renovarla y mejorarla para que cumpliera su función completamente, sobretodo el aislamiento lumínico.

2.2 OBJETIVOS

El objetivo primordial de este trabajo es introducir una serie de mejoras creando un rediseño de la estructura que cubre todo el equipo, así como optimizar el funcionamiento del sistema. Principalmente modificar la apertura de la estructura, facilitando el acceso a la parte interior, tanto para introducir las células solares, como en cualquier caso de avería que sea inevitable disponer de un acceso directo y rápido a la zona. Estas necesidades son las que han ido surgiendo después de un continuo uso del equipo, donde se han observado los fallos y mejoras a realizar.

La idea de crear una nueva estructura se basa en adecuarse a la función del equipo sin alterarlo estructuralmente, únicamente para adaptarlo de una mejor forma al rendimiento máximo del sistema.

También el desarrollo de una mesa como forma de apoyo de todo el equipo, incluso de la mesa óptica sobre la que queda fijado el conjunto.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Las tecnologías fotovoltaicas son relativamente jóvenes en cuanto a su desarrollo tecnológico. La energía solar fotovoltaica es actualmente, después de las energías hidroeléctrica y eólica, la tercera fuente de energía renovable más importante en términos de capacidad instalada a nivel global.

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma considerable desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales. Se ha conseguido aumentar las eficiencias y se está logrando que su coste medio de generación eléctrica sea ya competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas. Primero programas de incentivos económicos y, posteriormente, los sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios, han apoyado la instalación de la fotovoltaica en un gran número de países contribuyendo a evitar la emisión de una mayor cantidad de gases de efecto invernadero.

La tasa de retorno energético (relación entre la cantidad de energía total que es capaz de producir una fuente de energía y la cantidad de energía que es necesario emplear para explotar ese recurso energético) de esta tecnología por su parte, es cada vez menor. Con la tecnología actual, los paneles fotovoltaicos recuperan la energía necesaria para su fabricación en un período comprendido entre 6 meses y 1,4 años; teniendo en cuenta que su vida útil media es superior a 30 años, producen electricidad limpia durante más del 95% de su ciclo de vida.

La tecnología fotovoltaica genera corriente eléctrica continua cuya potencia es medida en vatios o kilovatios a partir de semiconductores cuando son iluminados por la luz solar. Esta tecnología presenta ventajas de cara a ser utilizada como complemento o sustituto a los combustibles fósiles, pero también se pueden enunciar algunos inconvenientes. Un listado de ventajas y desventajas serían:

VENTAJAS:

- Fuente de energía fácilmente accesible y prácticamente infinita.
- No produce emisiones, combustión o pérdidas radiactivas. No contribuye perceptiblemente al cambio climático ni contamina el agua o el aire.
- Tiene bajos costes de operación.
- No posee partes móviles que se puedan desgastar.
- Operan a temperatura ambiente.
- No están sometidas a problemas de corrosión o seguridad.
- Poseen una alta confiabilidad de los módulos solares (los fabricantes proporcionan garantías de 30 años).
- Alta predictibilidad a escala anual.
- Modular.
- Pueden integrarse en nuevas estructuras o en las ya existentes.
- Puede ser rápidamente instalada en casi cualquier parte.

DESVENTAJAS:

- Se puede comportar como una fuente de combustible difusa ya que la luz del sol tiene una relativamente baja densidad de energía.
- Altos costes de instalación iniciales.
- Su predictibilidad de producción por hora o día no es muy alta.
- No dispone de un tipo de almacenamiento de energía económico y eficiente.

3.2 CÉLULAS SOLARES

3.2.1 INTRODUCCION A LAS CÉLULAS SOLARES

Dentro de las células solares cabe destacar la importancia de su funcionamiento y conocer las características de los semiconductores, ya que estos materiales determinan la forma de trabajar del dispositivo. Los materiales semiconductores son elementos que a bajas temperaturas se comportan como aislantes, pero a medida que se eleva la temperatura o bien por la adición de determinadas impurezas pueden comportarse como conductores.

La unión de dos semiconductores de tipo opuesto, uno tipo p y otro tipo n (unión p-n) se denomina diodo, siendo éste un dispositivo electrónico que permite la circulación de corriente sólo en un sentido. Una célula solar es básicamente un diodo semiconductor que ha sido específicamente diseñado para absorber y convertir, de manera eficiente, la energía de la luz proveniente del Sol en energía eléctrica (fotodiodo), basándose en el efecto fotovoltaico.

3.2.2 FUNCIONAMIENTO FÍSICO DE UNA CÉLULA SOLAR

Las células solares pueden ser fabricadas con varios tipos de semiconductores, como el silicio, arseniuro de galio, fosfuro de indio y galio, etc. No obstante, el mercado fotovoltaico actual a nivel terrestre está dominado por las células solares de silicio, Figura 1. Esto se debe a que, aunque sus características de absorción no son las mejores, el silicio es muy abundante en la Tierra, y por tanto económico, y a que su tecnología está muy avanzada.



Figura 1.- Célula solar (izquierda) y planta de producción de energía fotovoltaica (derecha).

Para entender el funcionamiento de una célula fotovoltaica de silicio es necesario explicar brevemente las propiedades de los semiconductores, en particular del silicio.

Los electrones de un átomo no sienten todos la misma fuerza electrostática. Los más externos (electrones de valencia) se encuentran orbitando alrededor del *core* central del átomo (formado por el núcleo y los electrones internos). Los electrones de valencia sólo pueden tener unos valores determinados de energía, denominados niveles energéticos. El Silicio, en concreto, posee catorce electrones, de los cuales diez se encuentran fuertemente ligados al núcleo, mientras que los cuatro restantes son capaces de interactuar con los átomos vecinos.

Cuando los átomos de Si se unen entre sí, comparten los electrones de las últimas capas formando enlaces covalentes. Así, cada átomo de Si comparte uno de sus cuatro electrones de valencia con uno de los cuatro átomos colindantes, Figura 2. Estas uniones se producen de forma ordenada y dan lugar a un sólido de estructura cristalina bien determinada.

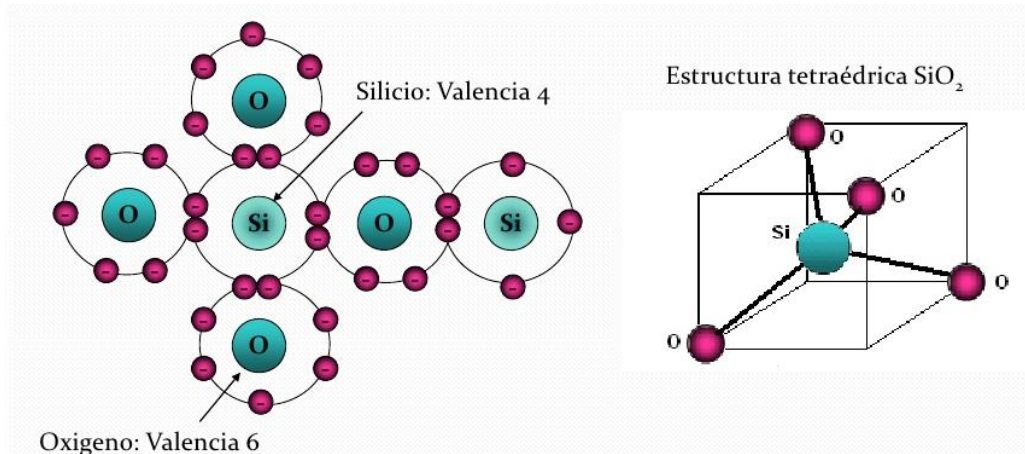


Figura 2.- Enlaces entre átomos de Silicio y estructura cristalina del silicio

El número de átomos en un sólido es tan elevado que los niveles de energía pasan a formar bandas continuas de energía. Estas bandas definen las propiedades electrónicas de un cristal.

La banda de mayor energía completamente ocupada se denomina banda de valencia, y la siguiente, parcialmente ocupada, se conoce como banda de conducción. Ambas bandas aparecen separadas entre sí por un intervalo que representa la cantidad de energía necesaria para que un electrón de valencia pueda romper el enlace que lo liga al átomo. Este salto energético se llama banda prohibida o gap de energía, y su anchura determina el tipo de material.

Este modelo de bandas permite explicar la conductividad eléctrica de los materiales. Para el caso de los semiconductores, a 0 K la totalidad de sus electrones de valencia se encuentra en la banda de valencia, por lo cual se comportarán como materiales aislantes; sin embargo, al incrementar la temperatura, o al dopar el material, aumenta la presencia de electrones en la banda de conducción.

Para conseguir que un semiconductor trabaje como una célula fotovoltaica es necesario crear una unión p-n, lo que se consigue dopando el material. Para ello, se agrega de manera controlada una cierta cantidad de impurezas al material semiconductor (dopantes), generando así un cambio en sus propiedades eléctricas.

El número de átomos dopantes necesarios para crear una diferencia en las capacidades conductoras de un semiconductor es muy pequeño. A los semiconductores con dopajes ligeros y moderados se los conoce como extrínsecos. Un semiconductor altamente dopado, que actúa más como un conductor que como un semiconductor, se denomina degenerado.

Las impurezas pueden ser de dos tipos:

- Donoras: en su última capa tienen un electrón más que los átomos que constituyen la red, por ejemplo fósforo (P) en el caso del silicio, Figura 3 izq.

- Aceptoras: en su última capa tienen un electrón menos que los átomos que constituyen la red, por ejemplo boro (B) en el caso del Silicio, Figura 3 dcha.

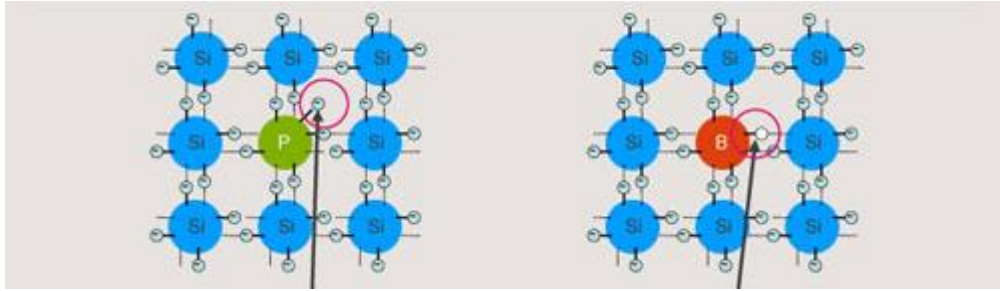


Figura 3.- efecto de impureza en red cristalina de Silicio.

Los semiconductores tipo n son aquellos en los que las impurezas que se introducen son donoras, por lo tanto tienen mayor concentración de electrones que de huecos. Se dice entonces que los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos los portadores minoritarios. Por ejemplo, al introducir una impureza de fósforo o arsénico (cinco electrones de valencia) en el silicio (cuatro electrones de valencia), el quinto electrón no queda bien ligado a la red (Figura 3 izq.), por lo que la densidad de electrones es superior a la de huecos. La rotura de este enlace se produce con baja aportación energética. De manera similar, si se introduce en una red de silicio una impureza aceptora, como aluminio o boro (tres electrones de valencia), hay un enlace sin cubrir (hueco), por lo que la densidad de huecos será mayor que la de electrones (Figura 3 dcha.), siendo los portadores mayoritarios los huecos. Este tipo de semiconductores son denominados tipo p. En la Figura 3. Se muestra el efecto de introducir una impureza de fósforo (izquierda) o de boro (derecha) en la red cristalina del silicio.²

En la fabricación de células solares se busca crear una capa con impurezas donoras junto a otra capa con impurezas aceptoras, denominada unión p-n.

En la zona de la unión p-n los electrones libres de la zona n se recombinan con los huecos libres de la zona p, de forma que se produce una zona de vaciamiento de carga donde solo quedan los iones fijos de la red cristalina (átomos que han cedido y ganado electrones). Por tanto la región frontera entre la zona de tipo n (cargada negativamente) y la zona de tipo p (cargada positivamente) posee iones fijos de carga eléctrica opuesta, lo que provoca que aparezca un campo eléctrico, figura 3.5.

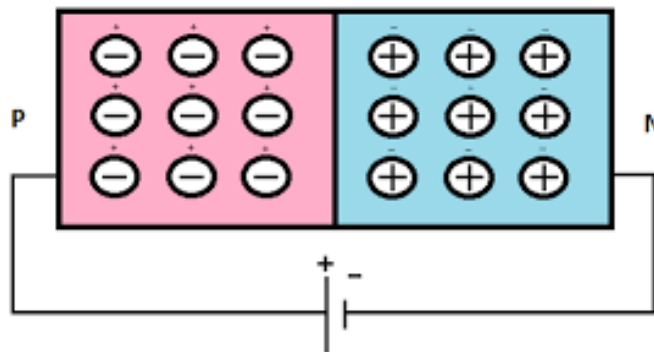


Figura 4.- Unión p-n y campo eléctrico creado debido a la zona de vaciamiento de carga.

Cuando un fotón con una energía interactúa con un cristal, puede ser absorbido o no por un electrón perteneciente a la banda de valencia. Si la energía incidente es mayor que, el electrón saltará a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia (proceso de absorción), como se puede ver en la Figura 5 (creación de un par electrón hueco).

El electrón excitado, al interactuar con la red del sólido, perderá rápidamente su energía, cayendo a la base de la banda de conducción (relajación). Si los electrones no son recolectados y conducidos a un circuito externo, regresarán a la banda de valencia emitiendo un fotón de energía.

Este fenómeno se denomina recombinación de un par electrón-hueco. Por otra parte, la presencia de impurezas en el cristal da lugar a niveles energéticos dentro de la banda prohibida y a posibles recombinaciones, tanto radiactivas como no radiactivas. En el caso de una célula solar, el campo eléctrico que aparece en la unión p-n permite la separación de los pares e-h.

En todo caso, en una célula solar, dado que el objetivo es mantener la existencia de la corriente eléctrica y aprovecharla externamente, es necesario evitar al máximo los procesos de recombinación de los portadores fotogenerados.

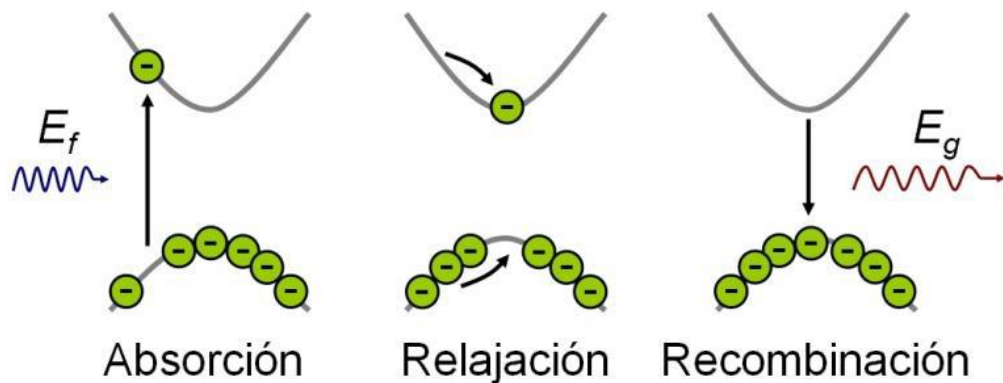


Figura 5.- Procesos sufridos por los electrones y huecos en los mecanismos de absorción, relajación y recombinación.

Así, tal y como se ha descrito, la absorción de la radiación luminosa al iluminar una célula solar crea pares electrón-hueco. El campo eléctrico debido a la unión p-n arrastra los electrones y huecos. Existe además otra corriente provocada por los mecanismos de difusión.

La corriente neta en una célula resulta del balance de estas dos corrientes y de la tasa de recombinación y generación de portadores de carga. Por lo tanto, el efecto fotovoltaico en una célula consta de dos procesos básicos: la generación de portadores al absorber la radiación luminosa y el desplazamiento de los portadores hasta la zona donde son recolectados (contactos metálicos), figura 6.

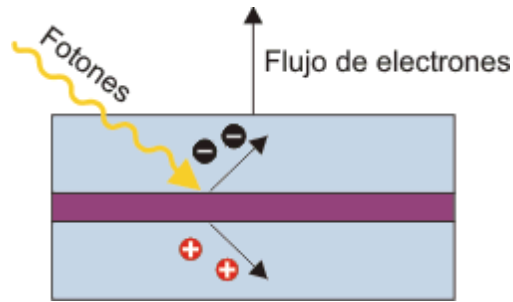


Figura 6.- Principio de funcionamiento de una célula solar (efecto fotovoltaico)

Como se ha mencionado, la presencia de impurezas en el cristal da lugar a la aparición de procesos de recombinación, radiativos y no radiativos. En este sentido, un parámetro básico de una célula solar es el tiempo de vida medio de los portadores minoritarios, directamente proporcional a la denominada longitud de difusión de los portadores minoritarios, que es la distancia promedio que un portador minoritario puede moverse desde el punto de generación hasta que se recombina. La longitud de difusión dependerá fuertemente del número de defectos presentes en el material, de forma que una elevada longitud de difusión (mayor tiempo de vida) es indicativa de materiales con mejores calidades, y por tanto está relacionada con mayores eficiencias en las células solares

Por lo general, el diseño de una célula solar eficiente tendrá dos objetivos: minimizar la recombinación a través del dispositivo debida a defectos y maximizar la absorción de fotones con energía.

3.2.3 ESTRUCTURA DE UNA CÉLULA SOLAR

La estructura de una célula convencional (también denominada de primera generación) se puede observar en la Figura 7:

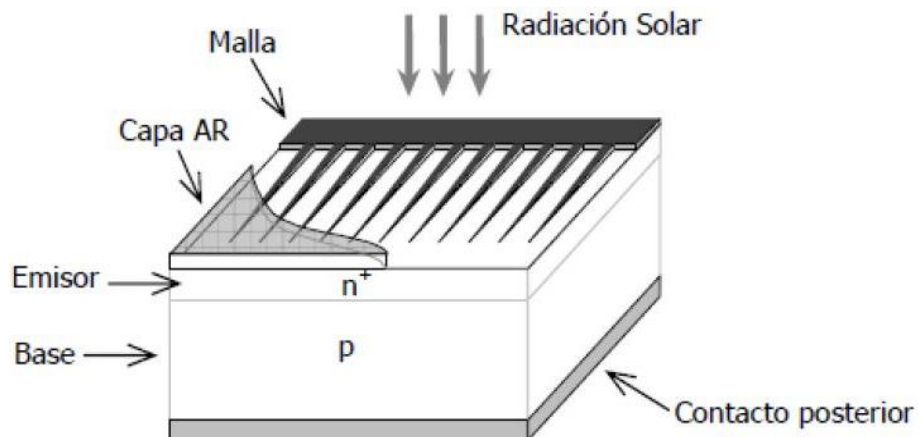


Figura 7.- Estructura básica de una célula solar.

Los componentes estructurales que forman el conjunto de la célula son:

- **Capa AR (antireflexiva):** su objetivo principal es reducir lo máximo posible las pérdidas debidas a la reflexión. Para ello la capa superior de la célula se texturiza, creando surcos o micro-pirámides en su superficie.

- **Malla:** éste elemento de la célula tiene como función recoger la carga generada por el dispositivo, evitando al mismo tiempo aumentar la resistencia eléctrica de la célula. De igual forma, esta malla metálica debe dejar pasar la mayor cantidad de luz posible hacia el interior de la célula, por lo que el área ocupada por la malla debe ser el mínimo posible. La relación entre el área ocupada por la rejilla y el área total de la célula se conoce como factor de sombra.

- **Capas de material semiconductor:** como se ha explicado, se trata de dos capas, una tipo n, emisora, y otra tipo p, base, (que en ocasiones pueden aparecer depositadas sobre un sustrato más grueso para aportar mayor resistencia mecánica al

dispositivo). Estas capas se colocan para formar una unión p-n, siendo por lo general una capa mucho más gruesa (encargada de absorber la luz, denominada base), que el otro (denominado emisor), pudiendo ser la base tipo p y el emisor tipo n, o viceversa. Tanto el espesor de estas capas como la concentración de impurezas presentes en ellas influirán en el rendimiento de la célula.

- **Contacto metálico posterior:** se trata de una fina capa metálica que ocupa toda la superficie posterior de la célula con la función de recoger la carga generada.

3.2.4 PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE UNA CÉLULA SOLAR

- Curva Intensidad – Voltaje (I-V)

Una célula solar en oscuridad funciona de manera análoga a un diodo, por lo que su curva I-V será como la que se muestra en la Figura 8, donde se observa que se tiene corriente solamente en un sentido. Por otro lado, en condiciones de iluminación, la respuesta I-V cambia, debido a los pares electrón hueco fotogenerados, como se muestra en la Figura 8.

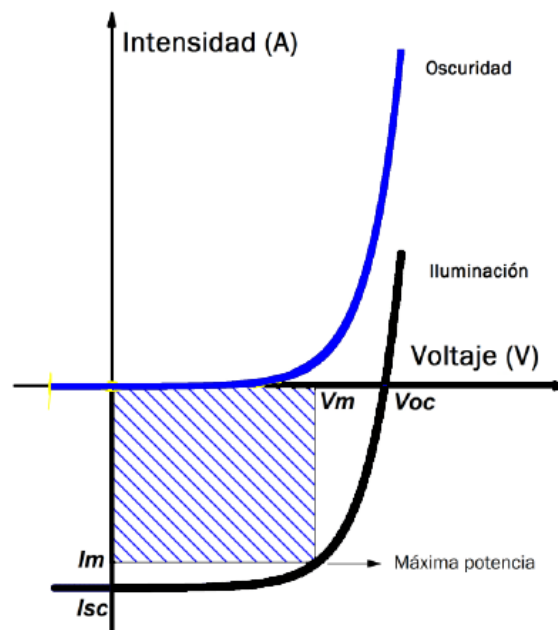


Figura 8.- Curvas I-V de una célula en oscuridad (azul) y en iluminación (negro).

A través de la curva I-V de la célula solar es posible obtener tres de sus parámetros fundamentales más importantes:

- La corriente de cortocircuito: es el mayor valor de corriente que puede obtenerse del dispositivo como generador.
- La tensión de circuito abierto: es la mayor tensión que polariza el dispositivo funcionando como generador.
- El punto de máxima potencia, donde es la corriente de máxima potencia y el voltaje de máxima potencia: es el punto en el que la potencia entregada por la célula es máxima. Otro factor fundamental usado para cuantificar la curva característica es el factor de forma (FF), que representa el tanto por ciento de área bajo el rectángulo definido por el punto de máxima potencia frente al área total bajo la curva I-V.

- Eficiencia de una célula solar: La eficiencia de una célula solar se define como la relación entre la potencia eléctrica máxima y la potencia solar incidente. Se deduce que una célula solar eficiente será aquella que posea una alta corriente de cortocircuito, alto voltaje de circuito abierto y un factor de forma lo más cercano posible a la unidad.

3.2.5 FABRICACIÓN DE UNA CÉLULA SOLAR

El silicio es el segundo elemento más abundante en la superficie terrestre. Por esta razón y por sus buenas propiedades como semiconductor, se trata de un material de elevado interés en la industria electrónica.

El silicio no existe en estado libre, sólo se encuentra en forma de dióxido de silicio y silicatos, por lo que es necesario someterlo a un proceso de purificación. Esta purificación se realiza en hornos a 1800°C, donde se produce una reducción del cuarzo mediante carbón, obteniendo silicio de grado metalúrgico y monóxido de carbono. Este silicio tiene una pureza de más del 99% (1000 ppm) y se utiliza en la industria metalúrgica para crear aleaciones especiales.

Para conseguir este orden de pureza se hace reaccionar el silicio de grado metalúrgico con ácido clorhídrico, obteniendo triclorosilano. Este se hace pasar por columnas de destilación y finalmente se hace reaccionar con hidrógeno dando lugar a silicio de grado electrónico ultra puro, denominado polisilicio, siendo este habitualmente la materia prima utilizada en la fabricación de obleas y células solares.

Una vez obtenidas las piedras de polisilicio, se realiza la cristalización del mismo. Dependiendo de su modo de cristalización se obtendrá silicio multicristalino o monocristalino. Actualmente, el multicristalino es el más utilizado en la industria solar.

El monocristalino se obtiene básicamente mediante el denominado proceso Czochralski, que consiste en la utilización de una semilla de cristal para hacer crecer Si a muy alta temperatura. Del proceso de cristalización del Si se obtiene un lingote de material cilíndrico macizo (su diámetro puede variar entre 100 mm y 150 mm y su longitud entre 40 cm y 150 cm) que posteriormente se mecaniza en forma cuadrangular y finalmente se corta para obtener obleas de 200 - 500 μm de espesor, Figura 10.

Para la fabricación de mc-Si, se utiliza generalmente el proceso de *blockcasting*.

En este se usa un crisol donde se depositan las piedras de polisilicio, fundiéndolas a continuación en un horno a elevada temperatura y dejando enfriar a

continuación el fundido (1). De la cristalización del mc-Si se obtiene un lingote de grandes dimensiones (70 cm x 70 cm) que se divide en *bricks* (prismas rectangulares con un tamaño acorde a la célula que se quiere fabricar después) y este, a su vez, se lamina en cientos de obleas, figura 9.



Figura 9.- Proceso de fabricación de una célula a partir de silicio monocristalino y multicristalino.

El enfriamiento del fundido en el procesado del mc-Si provoca que el material se fragmente, formándose multitud de cristales orientados aleatoriamente.

Esto provoca que las propiedades de las obleas no sean tan homogéneas como en el caso de las monocristalinas, que presentan un grano único con características uniformes. Sin embargo, la simplicidad en el proceso de fabricación del mc-Si implica un menor coste. El balance entre coste y pérdida de eficiencia es favorable en el multicristalino, razón por la que hoy en día es el material más utilizado en la fabricación de células solares a nivel terrestre, frente al monocristalino.

Una vez obtenida la oblea de silicio (usualmente dopada tipo p con boro), se procede de la siguiente forma hasta obtener la célula solar final (ver Figura 10):

1. Limpieza y texturización de las obleas mediante inmersión en solución ácida.
2. Dopado mediante fósforo (dopante tipo-n).
3. Aislamiento de la región tipo-n.
4. Aplicación de la capa anti reflejante.
5. Serigrafiado y secado en horno de infrarrojos de la cara delantera
6. Serigrafiado y secado en horno de infrarrojos de la cara trasera.
7. Cocción a alta temperatura de los contactos metálicos.
8. Pruebas y clasificación mediante la curva I-V obtenida con luz artificial.

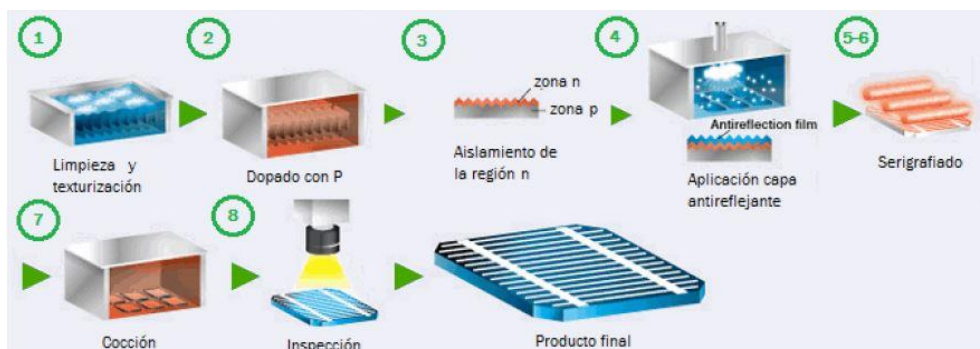


Figura 10.- Etapas de fabricación de una célula solar de Si

Las células solares de c-Si basan su eficiencia en la cristalinidad del material (existencia de un único grano). Sin embargo, las células mc-Si presentan un elevado número de granos, cuyo tamaño no supera el centímetro cúbico. Esto da lugar a un elevado número de defectos cristalográficos, en particular fronteras de grano, aunque

también existen numerosos defectos intra-grano como clusters de dislocaciones, impurezas, precipitados, etc. Dado que el crecimiento de los lingotes se realiza haciendo uso de crisoles con elementos de cuarzo y grafito, las principales impurezas son átomos de oxígeno y carbono (aunque también otros elementos como Fe, Cu, etc.) que se introducen en cantidades variables. Todos estos defectos se pueden convertir en centros de captura de carga de los portadores fotogenerados, disminuyendo de esta forma la longitud de difusión de los portadores minoritarios y por tanto la eficiencia de las células.

Además, pueden afectar también a las propiedades mecánicas de las obleas e incluso las propiedades de la unión p-n de las células, si los defectos penetran hasta la región de carga espacial. De esta forma, las células de mc-Si contienen un elevado número de defectos, cuya naturaleza, densidad y capacidad de captura de carga varían notablemente de unas zonas a otras.

A pesar de las ventajas del c-Si, la tendencia en la fabricación de células solares basadas en silicio se ha invertido en muy pocos años: las células solares basadas en c-Si, con una eficiencia de hasta un 27%, han dominado el mercado en la pasada década. Sin embargo, las condiciones experimentales para la preparación del c-Si y sobre todo la velocidad de crecimiento en torno a 1-3 $\mu\text{m}/\text{seg}$, han reducido la producción de c-Si a favor de células de mc-Si, que con velocidad de crecimiento de 30-50 $\mu\text{m}/\text{seg}$ dan eficiencias ya del orden del 21% con costes de fabricación sustancialmente menores, por lo que están emergiendo como el principal actor en el mercado fotovoltaico (FV).

En la actualidad el mercado de las células FV a nivel terrestre procede en ~ 60-65% de mc-Si, mientras que la producción mediante c-Si se ha reducido drásticamente a un 35-40% y estando en franco retroceso.

3.3 SISTEMA LIGHT BEAM INDUCED CURRENT (LBIC)

Para la mejora en el desarrollo y la producción de células solares se necesitan métodos de estudio analíticos que no empleen un contacto físico que pueda modificar las propiedades del material. Igualmente, los métodos de alta resolución espacial servirán para el estudio minucioso de las fuentes de contaminación, defectos y su contribución sobre el rendimiento del dispositivo. Éste es el caso de la técnica LBIC donde un haz de luz es enfocado sobre una superficie acotada sobre una muestra fotosensible. Este haz de luz generará una fotocorriente sobre el dispositivo que será medida en cortocircuito, (I_{sc}), y cuyo valor será representado espacialmente a través de coordenadas X-Y, Figura 11. Como resultado, se obtendrá una imagen que reflejará el comportamiento cualitativo en esa zona determinada de la célula solar.

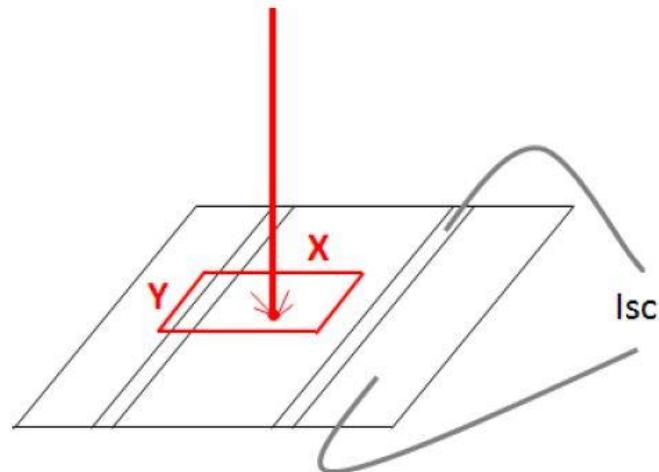


Figura 11.- Esquema simple de una medida LBIC. El rectángulo rojo sobre la célula solar representa la zona en estudio y las líneas grises curvas representan los contactos que recogerán la fotocorriente generada que será medida en cortocircuito.

La técnica LBIC ha sido aplicada tanto en investigación como en producción, determinando parámetros del semiconductor que servirán para la evaluación de su rendimiento. Con esta técnica se puede obtener la eficiencia cuántica de la célula resuelta de forma espacial, si se calibra la potencia óptica del haz de luz incidente y se utiliza iluminación monocromática. El cálculo de la eficiencia cuántica será necesario para determinar la longitud de difusión de los portadores minoritarios.

La medida de corriente fotogenerada punto a punto en cortocircuito, permite la generación de mapas LBIC que pueden ser relacionados con la eficiencia de colección de los portadores fotogenerados. Estos mapas representan la distribución espacial de defectos eléctricamente activos, tensiones, daños, precipitados, stacking faults, twins, clústeres de dislocaciones o incluso variaciones en el nivel de dopado.

Los tres modos más comunes de generación de imágenes LBIC están mostrados en la Figura 12. En esta técnica, los electrodos para la colección de carga y la circuitería externa de medición están unidos físicamente a través de cables de medida.

En la configuración mostrada en la Figura 12a, referida como modo contacto u Optical Beam Induced Current (OBIC), se requiere el conocimiento a priori de información sobre la presencia de una unión y su frontera metalúrgica para el correcto posicionamiento de los electrodos de medida. Para el modo remoto, Figura 12, los contactos se sitúan en dos tiras óhmicas situadas a ambos lados de la región de interés [15-19]. En este modo, la inyección introducida perturba el campo eléctrico (E) en la unión inundándolo con portadores libres [20]. Para mantener esa cuasi-neutralidad, debe fluir una corriente lateral desde la unión remanente, para establecer un campo que contrarreste al campo eléctrico transversal. Esos contactos pueden no ser permanentes y pueden estar situados a varios milímetros de distancia dependiendo de la resistencia entre la punta de medida y la unión. El escaneo del láser de izquierda a derecha a lo largo de la unión p-n conduce a una respuesta bipolar de corriente; el primer lateral encontrado muestra una corriente negativa mientras que el segundo contribuye con una corriente positiva. La Figura 12 c representa el modo remoto en una estructura típica de una célula solar mc-Si, siendo éste el modo que se va a utilizar para las medidas a realizar. En esta configuración la corriente puede ser medida entre los terminales A y B o A y C.

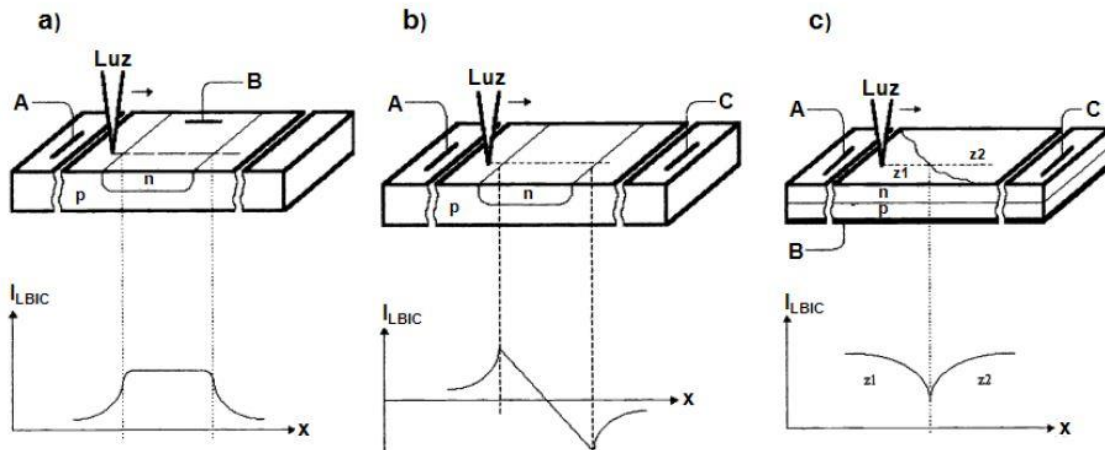


Figura 12.- Configuraciones básicas y resultados de la señal para la técnica LBIC: a) la corriente LBIC es medida directamente desde la unión p-n, b) los contactos A y C están hechos del mismo tipo que el semiconductor, c) configuración típica de una célula solar.

Las principales ventajas de la técnica LBIC incluyen:

- Posibilidad de estudiar tanto como los materiales utilizados para la fabricación de dispositivos semiconductores, así como los propios dispositivos una vez finalizados.
- Posibilidad de estudios tanto cualitativos como cuantitativos.
- Método de operación sin destrucción de dispositivos.

3.3.1 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El sistema LBIC desarrollado tiene como finalidad realizar un análisis de la uniformidad eléctrica en materiales considerados fotosensibles a fin de poder detectar defectos extendidos que puedan existir y que son nocivos para las aplicaciones fotovoltaicas. El sistema ha sido utilizado sobre obleas y células solares tanto experimentales como comerciales. Ha sido de los primeros equipos de fotocorriente en caracterizar obleas de la nueva generación *mono-like* y *cuasi-mono*, basadas en el crecimiento de obleas monocristalinas con métodos de crecimiento utilizados habitualmente para células policristalinas.

El sistema puede dividirse en dos bloques bien diferenciados. El primero de ellos referido a los componentes físicos del sistema, tanto a los elementos hardware que lo componen, como a su disposición sobre el tablero de medida y a su interconexión. El segundo bloque lo componen el diseño y desarrollo del software de control encargado de interactuar con los diferentes elementos, llevando a cabo el sincronismo entre los movimientos de la mesa y las adquisiciones de datos. También se encarga de representar los resultados al usuario de forma clara, así como del almacenamiento y recuperación de sesiones de medida.

3.3.2 MONTAJE FÍSICO

El montaje físico del sistema LBIC es el mostrado en la Figura 13. Algunos componentes, como la caja negra en la que está contenido el microscopio óptico, no

han sido representados para una mayor simplicidad del esquema, aunque en la realidad es un componente indispensable para el proceso de medida.

El sistema LBIC ofrece la posibilidad de utilizar distintas longitudes de onda y potencias de excitación a través de dos equipos láser duales capaces de proporcionar por un lado longitudes de onda de 639 nm y 830 nm y por otro lado 853 nm y 975 nm. Esto permite la obtención de mapas a diferentes profundidades dependiendo de la excitación utilizada. Además, el uso de al menos dos longitudes de ondas diferentes, permitirá la obtención de los parámetros necesarios para el cálculo de mapas longitudes de difusión de los portadores minoritarios.

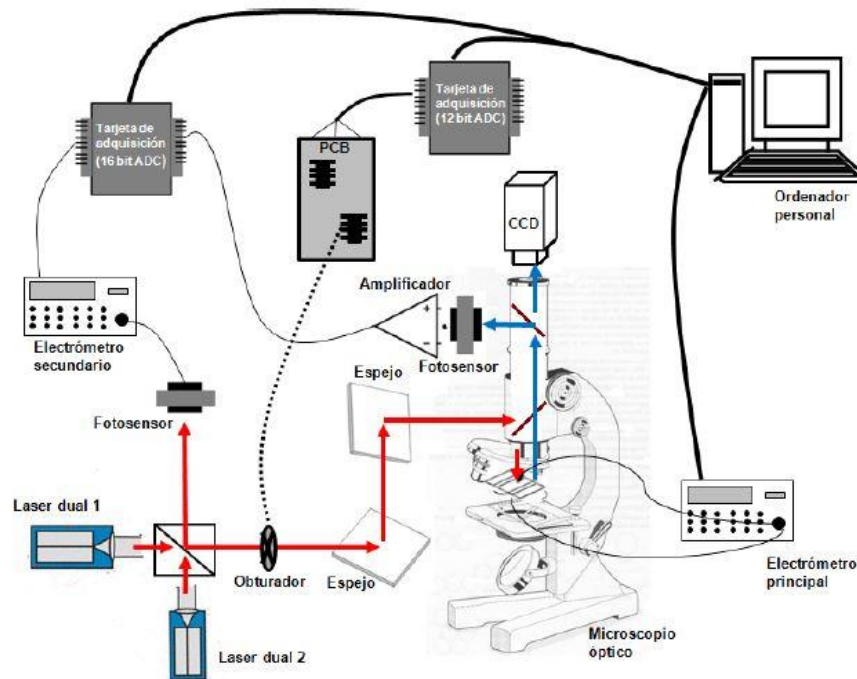


Figura 13.- Esquema del sistema de medida LBIC. Las líneas rojas indican el camino de la luz de excitación desde su origen hasta la muestra. Las líneas de color azul muestran el recorrido de la luz reflejada desde la muestra a los sensores de detección.

En este sistema se utiliza un microscopio óptico con distintos objetivos para focalizar el haz láser sobre las muestras y así poder utilizar haces de excitación de distinto tamaño. Se podrán obtener mapas con una gran resolución espacial y así obtener una imagen más detallada del comportamiento de los defectos. Para el proceso de medida, se sitúa la muestra sobre una mesa de posicionamiento motorizada (X-Y-Z). El valor de la fotocorriente generada se puede asignar a la posición espacial por medio de unas coordenadas X-Y localizadas, mientras que el movimiento en el eje Z se utilizará para no perder el enfoque en superficies muy irregulares, curvas o inclinadas. Con el objeto de relacionar el valor de la fotocorriente con el valor de la potencia óptica de excitación (en casos donde ésta última sea muy inestable), se dispone de un fotodiodo de silicio que monitoriza en tiempo real la intensidad de excitación. Así se podrán detectar posibles variaciones de excitación que conlleven fluctuaciones de corriente no causadas por defectos. Un segundo fotosensor de silicio situado en la posición de los binoculares del microscopio, se encarga de monitorizar la luz reflejada del espécimen proporcionando una información más amplia sobre su comportamiento.

De esta manera se tendrá constancia de la variación espacial de la reflectividad necesarias para el cálculo de la eficiencia cuántica y de la longitud de difusión de los portadores minoritarios.

A continuación se enumeran los componentes físicos del sistema junto con una breve descripción de su funcionamiento y función dentro del sistema.

3.3.2.1 EQUIPOS LÁSER DUALES

El sistema LBIC utiliza un montaje físico en el que la óptica y el alineamiento juegan un papel importante. Si el camino óptico de la luz de excitación hacia el objetivo de enfoque no es preciso, se pueden dar situaciones de pérdida de potencia óptica,

tamaños de spots inadecuados o mediciones de luz reflejada incorrectas. Para facilitar la labor de alineamiento y minimizar estos errores, se optó por la adquisición de dos equipos de láseres duales capaces de proporcionar dos haces láser monocromáticos de diferente longitud de onda cada uno de ellos. El primero de ellos suministra longitudes de onda de 635 nm y 830 nm mientras que el segundo proporciona haces de 853 nm y 975 nm. La dualidad de estos equipos permite que el camino óptico recorrido por cada par de láseres sea el mismo ya que poseen la misma confinación óptica, con lo cual sólo es necesario el alineamiento de uno de ellos para que el otro también lo esté.

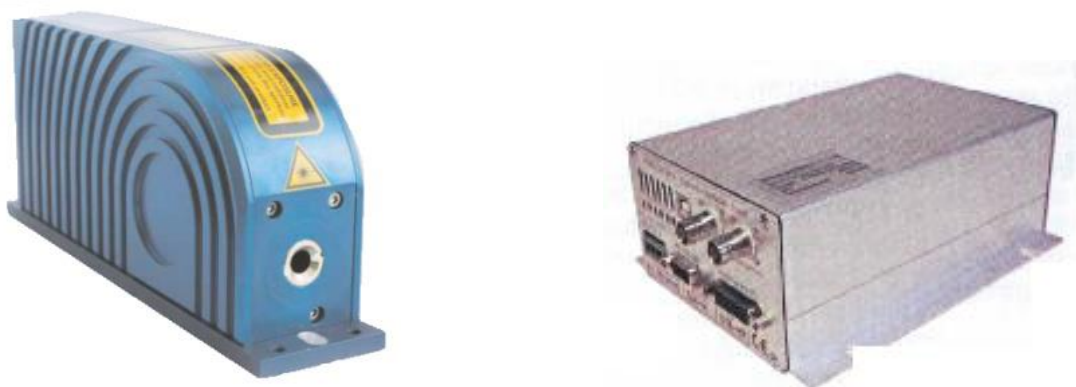


Figura 14.- Imagen de una de las cabezas de los dispositivos laser duales con su fuente de alimentación. Equipo láser (izquierda) modelo LDM635/830.0.CWA.I y fuente de alimentación (derecha) modelo LDM850/980.150.CWA.L.

Una característica importante de este tipo de láseres es que proporcionan una gran estabilidad en la potencia óptica a la salida del dispositivo.

Estos equipos ofrecen la posibilidad de ser controlados a través del puerto serie de un ordenador personal mediante el protocolo RS-232. El fabricante proporciona un software específico para el control de la potencia del láser, control de temperatura, encendido y apagado, etc. En la Figura 14 se puede observar la cabeza de emisión de luz.

3.3.2.2 ELECTRÓMETROS

El sistema utiliza dos electrómetros para la monitorización de señales. Uno de ellos, al que denominaremos electrómetro principal, es el encargado de la medición de la intensidad de corriente en cortocircuito generada en el material. Éste posee unas

características y una sensibilidad acorde a las señales de corriente que se desea medir y una salida digital con la que se comunica con el software instalado en el ordenador personal. El segundo de ellos, al que llamaremos electrómetro secundario, se utiliza como amplificador de transimpedancia, para convertir la señal de corriente proporcionada por el fotosensor durante la monitorización de la potencia de excitación, en una señal de voltaje para su digitalización a través de una tarjeta de adquisición de datos USB.



Figura 15.- Electrómetro *Keithley* modelo 6514 utilizado para la medida de fotocorriente generada en los materiales fotosensibles en estudio.

Este electrómetro está especialmente diseñado para la medida de bajos valores de corrientes en cortocircuito como puede ser el caso de la señal LBIC. Como explicación de su diseño, se proporciona información sobre el comportamiento interno del equipo cuando se pretende medir la corriente de oscuridad en un fotodiodo.

3.3.2.3 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

Para el mapeado de superficies se necesita un dispositivo que realice movimientos precisos y altamente repetibles. En este sistema LBIC, por sencillez, se ha optado por dejar fijo el haz de excitación y que sea la muestra la que se desplace para su estudio. Para ello se cuenta con una mesa posicionadora en la que los movimientos se realizan gracias a motores paso a paso que desplazan una pletina sobre la que situaremos la célula. La mesa dispone de un controlador de motores con conectividad USB para la automatización de estos movimientos y el control de la posición espacial donde se estén analizando las propiedades del material. El sistema de posicionamiento tiene su propio software de control (sólo utilizado para el testeo ya que, en la medida LBIC, se utilizará con un software propio) y drivers para LabView. Además de este equipamiento, se dispone de un motor paso a paso adicional que estará acoplado al sistema de enfoque del microscopio óptico. Este motor se encargará de mantener el haz de excitación enfocado sobre la muestra a pesar de su relieve e inclinación. Por este motivo, el software dispondrá de un algoritmo de autoenfoco.



Figura 16.- Controlador *ProScan II* de la mesa (izquierda), mesa motorizada *H101* (centro) y joystick (derecha) que componen el sistema de posicionamiento.

3.3.2.4 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS

Además de la señal de fotocorriente generada en el material, se monitorizan otras señales de importancia. Éstas no requieren un equipo de medida muy preciso, por lo que se han utilizado sistemas de adquisición de datos menos potentes que los electrómetros. Se han adquirido dos tarjetas de adquisición externas de propósito general controladas mediante USB del fabricante *Data Translation* y de modelos DT9812-10V, DT9816-OEM. Ambos modelos y sus principales características están mostradas en la Figura 17.



Figura 17.- Tarjetas de adquisición de datos externa, imagen y características del modelo DT9812-10V (izquierda) y DT9816-OEM (derecha).

La primera de las dos tarjetas, el modelo *DT9812-10V*, se utiliza para el control de dos circuitos que sirven de ayuda en diferentes tipos de medida. El primero de ellos se utiliza en las medidas de I-V, donde sus salidas digitales gobiernan las entradas de un circuito que permite el intercambio de polaridad de alimentación cuando se realiza un barrido de tensiones desde valores negativos a valores positivos y viceversa.

La segunda tarjeta, el modelo *DT9816-OEM* cuya principal diferencia con el modelo anterior es que carece de salidas de tensión analógicas y que su convertidor analógico/digital (ADC) es de 16 bits en lugar de 12, se utiliza en la medida de la señal que proviene del electrómetro secundario del sistema. Si se recuerda, el electrómetro secundario se encarga de convertir la señal de corriente que proviene de un fotosensor de silicio en tensión que, posteriormente, se digitaliza a través de esta tarjeta de adquisición, y cuyo resultado se transfiere al software de medida. También se utiliza en la digitalización de la señal de salida del amplificador de transimpedancia encargado de adaptar la señal proveniente del fotodiodo de silicio que monitoriza la luz reflejada por la muestra.

3.3.2.5 ELEMENTOS OPTICOS

ESPEJOS

Los espejos son utilizados para el alineamiento del haz de excitación hacia la entrada al microscopio. Poseen una forma circular y una superficie plana. Están posicionados sobre monturas, en su mayoría Newport, que permiten movimientos precisos para los ajustes de alineamiento. Su superficie frontal está recubierta de plata (RAGV).

BEAMSPLITTER

Otro elemento óptico en el camino de la luz de excitación hacia el microscopio, es un beam-splitter cuya misión es la de dividir el haz en dos; uno de ellos dirigido hacia el fotosensor que mide la potencia de excitación y el otro hacia la entrada del microscopio. Los beamsplitters utilizados tienen forma cúbica con aristas de 5 mm de longitud. Como muchos elementos ópticos, sus características de transmisión dependen de la longitud de onda que se utilice. En concreto, se dispone de dos cubos, cada uno de ellos adecuado para un rango de longitudes de onda distintas.

OBJETIVOS

Los objetivos están adaptados al microscopio y se utilizan para focalizar el haz de excitación sobre la muestra. Se dispone de seis objetivos de distinta magnificación dispuestos en dos revólveres distintos. El primero tiene objetivos de x5, x20 y x100 mientras que el segundo dispone de x10, x50 de larga distancia de trabajo y x50. Todos los objetivos han sido fabricados por Olympus. En la parte superior del microscopio se dispone de una cámara CCD que será utilizada por el algoritmo de enfoque y para la captura de imágenes de la superficie de la muestra. Dependiendo del objetivo utilizado, el área que visualizada con la cámara será distinta, siendo mayor para un objetivo de x5 que para uno x100.

3.3.2.6 PLACA CONTROLADORA DE POLARIDAD EN MEDIDAS I-V Y CONTROL DE OBTURADOR

Se hizo necesario el diseño de un par de circuitos específicos para el complemento de algunos tipos de medidas. Éste es el caso de las medidas I-V donde se hizo necesario un circuito que actuara como switch para el intercambio de polaridades en el barrido de tensiones y para el caso de las medidas de transitorios de corriente donde se necesita el control de la apertura y cierre de un obturador o *shutter*.

Las medidas I-V se llevan a cabo polarizando una muestra en un rango de valores de voltaje definidos por el usuario. Este rango puede comprender valores de voltaje positivos, pasando por un valor de 0 V y continuando con valores negativos de polarización o viceversa. El voltaje de polarización lo proporciona una fuente de alimentación externa que es controlada por el software a través del puerto USB.

3.3.2.7 FUENTE DE ALIMENTACION EXTERNA

El sistema requiere para algunos tipos de medidas, como las I-V, o la alimentación de los circuitos integrados, una fuente de alimentación que proporcione corriente a los dispositivos que lo necesitan. Para completar el equipamiento, se ha adquirido una fuente programable del fabricante *Motech* cuyo modelo concreto es el *LPS 505N*. Entre sus características se encuentra la posibilidad de control remoto mediante su puerto USB y control mediante el uso de comandos SCPI.



Figura 18.- Fuente de alimentación programable externa utilizada para el funcionamiento de circuitos integrados y en los barridos de voltaje en las medidas I-V.

3.3.2.8 FOTOSENSOR DE MONITORIZACION DE LA INTENSIDAD DE EXCITACIÓN

La intensidad de corriente fotogenerada medida puede sufrir variaciones significantes si se producen alteraciones en la potencia óptica de excitación, cuando ésta no es estable. Para detectar estas variaciones de excitación, se ha situado un fotosensor a uno de los lados del beamsplitter en el camino del haz excitación, donde la potencia óptica debería ser constante. El fotosensor consiste en un diodo PIN modelo S6848 que se presenta en un encapsulado tipo TO-18 para poder ser insertado en una placa de componentes. Entre sus características se habla de una rápida respuesta a los cambios de iluminación y un amplio rango espectral hasta cerca del infrarrojo.

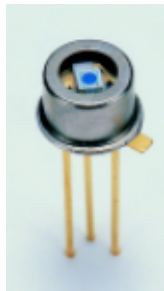


Figura 19.- Encapsulado en el que se comercializa el diodo PIN utilizado como fotosensor.

La salida del fotosensor será monitorizada para detectar posibles inestabilidades de la fuente de excitación que provoquen variaciones en la fotocorriente que no sean debidas a componentes intrínsecos del material en estudio y así poder ser identificadas.

3.3.2.9 FOTOSENSOR DE MEDIDA DE LA POTENCIA DE LUZ REFLEJADA

En este equipos se ha utilizado un sistema completo de medida Hamamatsu, compuesto por un fotodiodo modelo S2281 y un amplificador modelo C9329 diseñado específicamente para este tipo de propósitos. El amplificador C9329 es un conversor corriente/voltaje usado para amplificar con muy bajo ruido los pequeños valores de corriente que provienen del fotodiodo.

Dispone de tres rangos de sensibilidad de detección (H, M, L) para adecuar el nivel de amplificación. Puede ser alimentado a través de una pila de 9V convencional o mediante una fuente de alimentación externa. Su señal de salida es un voltaje analógico por lo que irá conectado a una de las tarjetas de adquisición de datos externa, para que esta información pueda ser utilizada por el software de medida.

El fotodiodo S2281 se une con el amplificador a través de un cable BNC. El encapsulamiento del sensor facilita su acoplamiento a uno de los binoculares del microscopio donde se medirá la potencia de luz reflejada. En la Figura 20 se observa una imagen del dispositivo de medida de potencia de luz.



Figura 20.- Imagen del amplificador y del fotosensor.

3.3.2.10 CAMARA CCD DE AUTOENFOQUE

En la zona superior del microscopio óptico se ha adaptado una cámara CCD que servirá para la aplicación del algoritmo de autoenfoco, en la aplicación de las medidas de reconstrucción de superficie y, en algunos casos, también se puede utilizar para la medida de luz reflejada.



Figura 21.- Imagen de la cámara modelo es el SSC-M370CE utilizada en el algoritmo de autoenfoco, en la medidas de reconstrucción de superficie y en algunos casos para la monitorización de la luz reflejada.

Este dispositivo será una cámara de propósito general utilizada en circuitos cerrados de televisión (CCTV). Su fabricante es SONY y su modelo es el SSCM370CE. La imagen de salida se transmite de forma analógica mediante un cable coaxial hacia un monitor y hacia una tarjeta capturadora de video.

3.3.2.11 TARJETA CAPTURADORA DE VIDEO

La salida analógica de la cámara de autoenfoque se conecta a un monitor externo y a una tarjeta capturadora de video insertada en una bahía PCI del ordenador personal.

La capturadora es un modelo de Avermedia modelo AverTV con un chipset BT878. Estará configurada para la captura de video en formato PAL con una resolución de 640x480 píxeles, resolución VGA.

3.3.2.12 SISTEMA DE ALINEAMIENTO DEL HAZ DE EXCITACIÓN

El equipo LBIC dispone, como ya se ha reseñado, de una excitación con cuatro longitudes de onda que provienen de dos equipos láser duales distintos. En el camino de los haces de luz, tienen que incorporarse elementos que permitan modificar su alineación con elevada precisión. Se necesita que el haz entre por el objetivo de la forma más perpendicular posible para controlar el tamaño del spot y recoger la luz reflejada de la forma de forma precisa. Para ello se dispone de un juego de espejos como el de la Figura 22.

Se aprecia como el láser dual 1 dispone de un juego de dos espejos más que el láser dual 2 para ajustar la dirección del haz por lo que primeramente, para alinear el sistema, habrá que ajustar el láser 2 y posteriormente el láser 1. Cada juego de espejos dispone de tres tornillos micrométricos que proporcionan desplazamientos en vertical, horizontal y diagonal de su superficie. La finalidad es que el haz de excitación se introduzca por el agujero que dispone la caja negra que contiene el microscopio de tal forma que entre perfectamente alineado con el eje óptico del objetivo utilizado.

El correcto alineamiento es una tarea importante ya que permite conocer el diámetro del spot del haz además de recoger correctamente la luz reflejada por la célula.

El proceso de alineamiento puede ser un poco lento ya que puede necesitar ajustarse hasta un total de cuatro espejos en el peor de los casos, pero es necesario para obtener resultados de buena calidad.

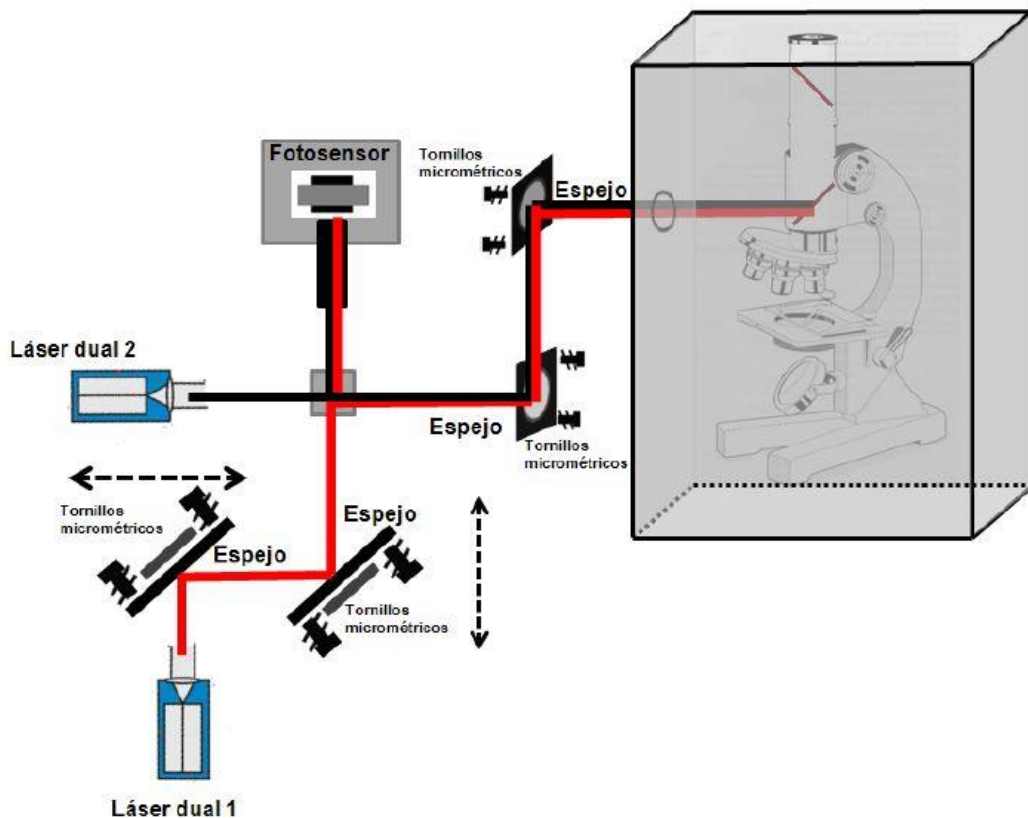


Figura 22.- Esquema del sistema de alineamiento. En total se disponen de un juego de cuatro espejos con múltiples tipos de movimientos gracias a los tornillos micrométricos de los que disponen.

3.3.3 COMPONENTES DE SOFTWARE

Además de los componentes hardware, el componente software es un elemento esencial dentro del sistema de medida, ya que se encarga del control y sincronización de los dispositivos durante el proceso de caracterización. También será el encargado de la representación de los resultados así como del almacenamiento y recuperación de las sesiones de medida.

Existe una herramienta de programación gráfica orientada hacia aplicaciones de control de equipos electrónicos utilizada en el desarrollo de sistemas de instrumentación, conocido como instrumentación virtual. Su nombre es LabView que es acrónimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* y se describe como una herramienta de desarrollo con la que se pueden crear aplicaciones de forma rápida. Todo esto unido a la gran aceptación de los fabricantes de hardware para facilitar librerías de desarrollo, hizo que LabView fuera el entorno de programación elegido.

Como resumen de las características más importantes que ofrece esta plataforma de programación, se puede destacar:

- Se reduce considerablemente el tiempo de desarrollo de las aplicaciones.
- Los sistemas programados están dotados de una gran flexibilidad, permitiendo fácilmente cambios y actualizaciones tanto en el software como en el hardware.
- Está dotado de un compilador totalmente gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.

- Tiene además la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

3.3.3.1 SOFTWARE DE CONTROL

La aplicación de control para la automatización de las medidas LBIC, ha sido finalmente desarrollada en LabView v8.5 en su versión profesional. A través de este software el usuario puede testear y controlar todos los equipos que componen el sistema (equipos láseres dual, electrómetros, mesa de posicionamiento, fuente de alimentación externa, capturadora de video, tarjeta de adquisición de datos, etc.) así como ejecutar cada uno de los tipos de medidas que han sido programados. En la Figura 23 se muestra la pantalla principal del software y la información visual que ofrece.



Figura 23.- Captura de pantalla de la ventana de inicio del software de medida. En ella se indican que componentes se encuentran comunicados con el equipo y muestra información adicional sobre ellos.

En la pantalla de inicio de la aplicación se pueden visualizar los principales dispositivos que componen el sistema y una breve información sobre los mismos. En el proceso de inicialización, el software primeramente intenta reconocer el hardware electrónico que está conectado y si está listo para ser utilizado.

Desde la pantalla inicial se puede acceder a la zona de configuración y testeo del hardware y a la selección del tipo de medidas. En la pantalla de configuración y test de hardware, el usuario puede seleccionar el dispositivo que se desea configurar o testear, Figura 24. Tanto la fuente de alimentación externa, como cualquiera de las dos tarjetas de adquisición USB, la mesa posicionadora, la capturadora de video, el electrómetro o los láseres, pueden ser configurados desde aquí, pero no se van a mostrar capturas de pantalla debido a cuestiones de espacio.

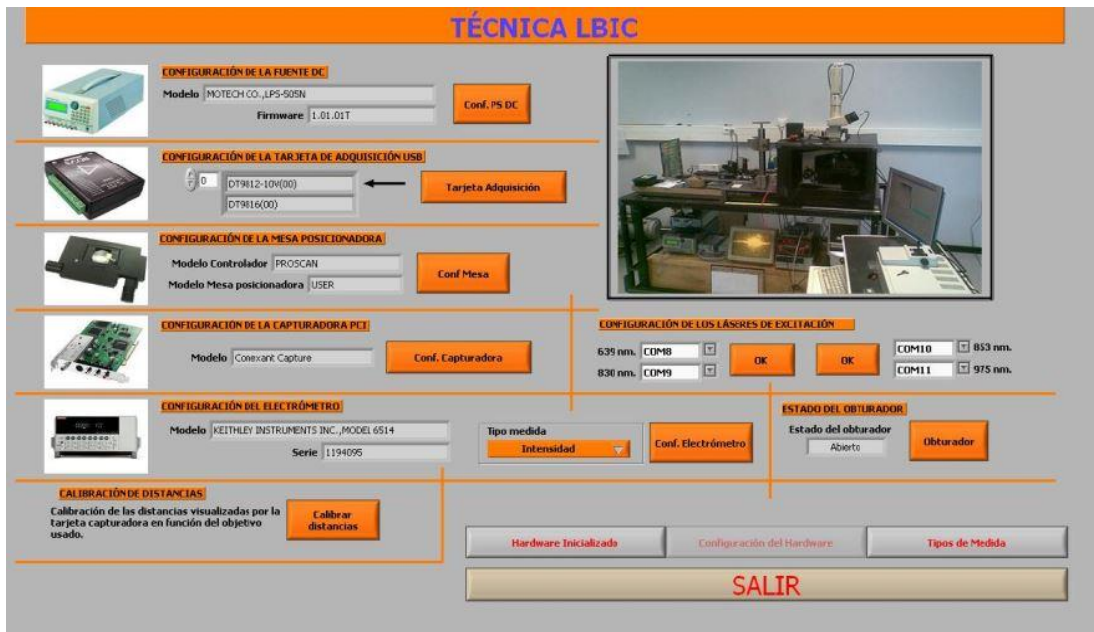


Figura 24- Captura de pantalla de la ventana de selección del dispositivo que se desea configurar o testear.

3.4 TOMA DE MEDIDAS

Con este equipo se pueden caracterizar obleas de silicio como células solares. Para llevar a cabo este tipo de medidas LBIC, es necesario disponer de información suministrada por el usuario. Con los valores por defecto que propone el software, se pueden realizar directamente las primeras medidas pero es recomendable adecuar los parámetros dependiendo de las necesidades. La pantalla de configuración de las medidas LBIC está mostrada en la Figura 25.

En primer lugar el software ofrece la posibilidad de llevar a cabo dos tipos de medidas LBIC en función de la forma con la que se captura la fotocorriente generada:

1. La fotocorriente se captura en una única adquisición dejando al electrómetro que seleccione un tiempo de integración automático para su digitalización.
2. Se realizan varias capturas de fotocorriente (cantidad determinada por el usuario) con un tiempo de integración determinado por el usuario y se almacenan en el buffer interno del electrómetro. Posteriormente se calcula su media aritmética y este valor será tomado como valor final.

Pruebas posteriores han determinado que el resultado obtenido con ambos tipos de medida ha sido parecido con la ventaja de que en el segundo tipo de medida, el tiempo de medida es menor.

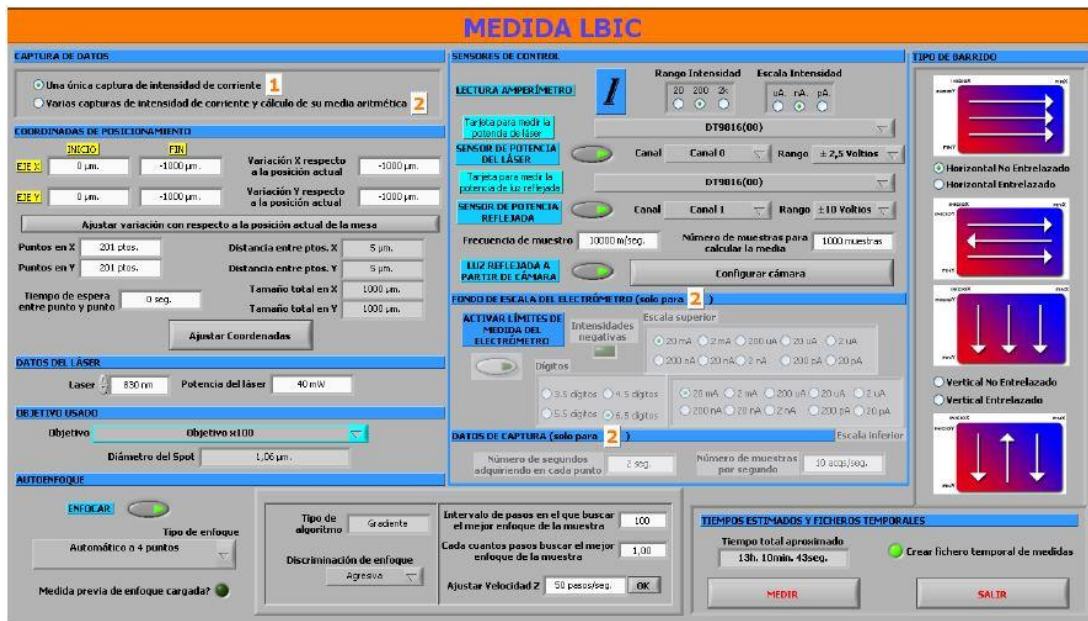


Figura 25.- Captura de pantalla de la ventana de configuración de la medida LBC. El usuario deberá modificar los parámetros para adaptarlos a la necesidad del estudio.

4. EQUIPO EXISTENTE

La nueva estructura propuesta en esta memoria de TFG surge debido a la necesidad de renovar y mejorar las prestaciones de la anterior, ubicada en el laboratorio del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid.

La nueva estructura se ha creado basándose en un prototipo que ya estaba puesto en funcionamiento. A continuación se describen las características principales y el funcionamiento del equipo.

4.1 CARACTERÍSTICAS

La estructura anteriormente creada únicamente deja cubierta una zona de equipo de medida, en la que se incluyen el microscopio y la base donde queda centrada la célula solar, y deja a la intemperie la parte de los láseres de diodo y los espejos, lo que a la larga puede ocasionar fallos en los dispositivos debido a la suciedad y el polvo. Toda la estructura queda fijada en una mesa óptica, de la que se puede desmontar, proporcionando una estabilidad al equipo aislándolo de vibraciones.

La cubierta se compone de planchas de acero selladas con cinta negra para aislar la zona lumínicamente lo mejor posible, aunque no queda completamente aislada, ya que las planchas no encajan entre sí. También posee limitaciones a la hora de acceder a la parte interior del equipo. Carece de puertas, únicamente posee láminas de acero atornilladas a las diferentes caras de la estructura de recubrimiento, que habría que desatornillar cada vez que sea necesario introducir una nueva célula o algún fallo en el equipo, que será un trabajo incómodo y tedioso. En la figura 26 se puede observar las diferentes partes en las que se divide el equipo y su distribución.

En la figura 26 se aprecia una clara diferencia entre la parte cubierta y la otra parte sin cubierta. El equipo está compuesto por dos elementos principales: (1) el conjunto de láseres de diodo, con sus sistemas de refrigeración, y sus correspondientes espejos y (2) el microscopio y el soporte de la célula solar. En esta estructura únicamente quedaría aislada lumínicamente la parte 2, pero para mejorar el sistema debería quedar cubierto todo el equipo por completo, así nos aseguramos del aislamiento.

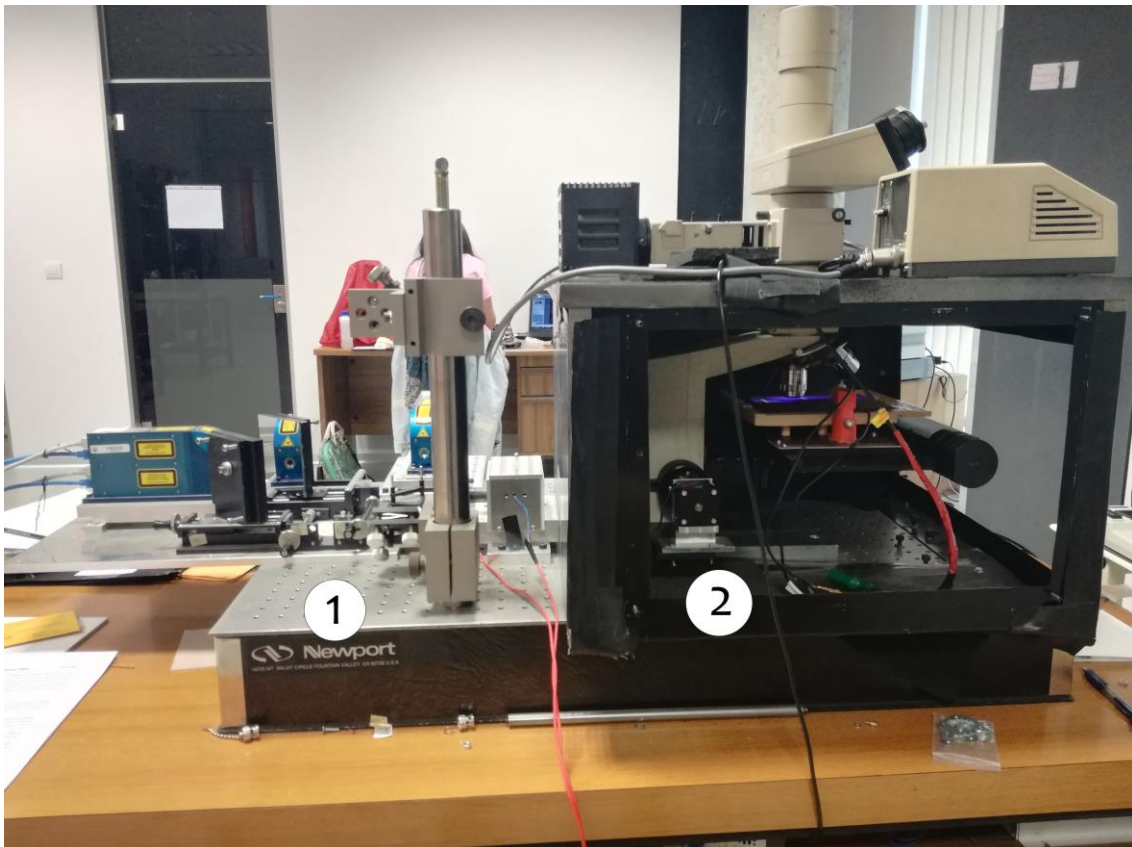


Figura 26.- Vista del equipo completo.

4.2 COMPONENTES

La estructura antigua está formada por una composición láminas metálicas de 1 mm de espesor, que se acoplan a la zona donde se sitúa el microscopio y el sistema de posicionamiento del equipo cubriéndolo por completo. Toda la estructura queda fijada sobre una mesa óptica, que proporciona una estabilidad al equipo, lo aísla de vibraciones y lo fija mediante unas roscas de métrica 6. El equipo fijado a la mesa óptica a su vez se ubica encima de una mesa convencional de madera, como se puede observar en la Figura 27. Se trata de una estructura provisional, ya que las diferentes planchas de metal quedan unidas por cinta aislante negra, aislando el interior lumínicamente. También quedan entre sí mediante tornillos y tuercas aquellas partes de la estructura que tengan que facilitar la apertura de la misma para acceder al interior, ya que es necesario introducir la célula solar. Estas láminas deben ser de fácil extracción, y el hecho de que estén fijadas con cinta aislante y tornillos con tuercas hace que sea más tedioso el proceso de introducir la célula solar, por lo que es un punto importante a mejorar dentro de la nueva estructura.

En la Figura 27 se pueden apreciar los componentes del equipo.

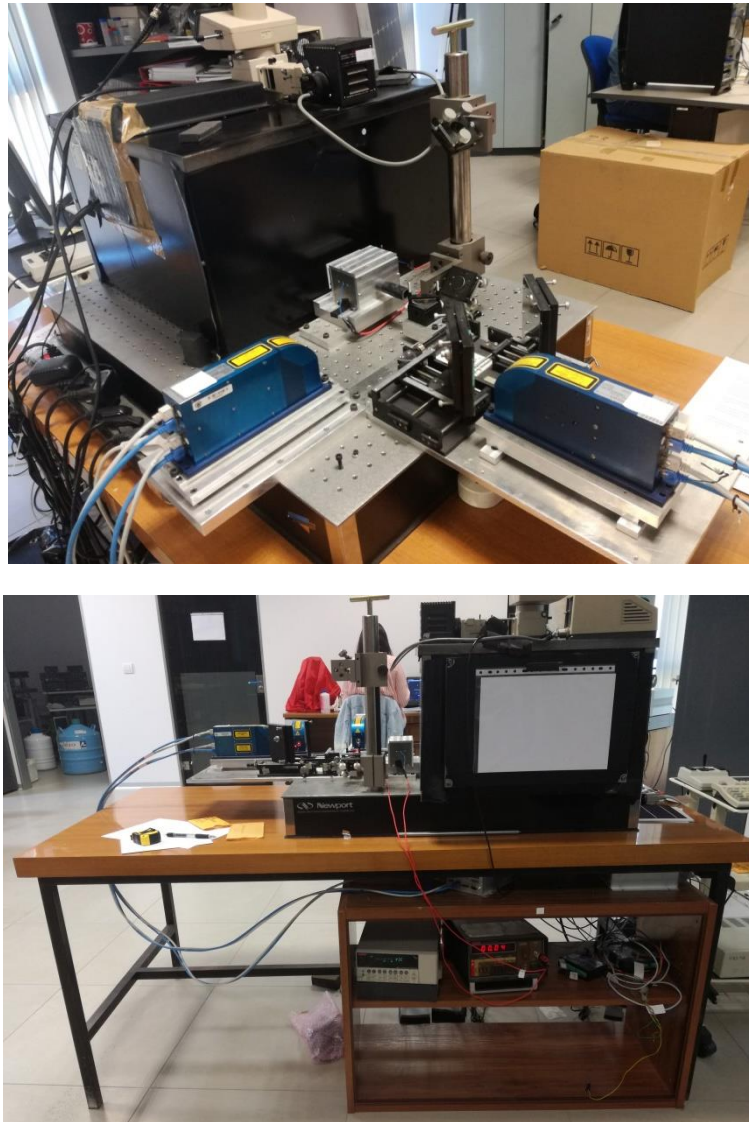


Figura 27.- Equipo antiguo en 2 vistas diferentes.

4.3 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

A la hora de usar el equipo, las funciones que debe cumplir la estructura son la facilidad para apertura y el perfecto aislamiento lumínico del equipo.

En este caso la apertura no es fácil y cómoda, ya que para introducir la célula solar en el interior debemos desenroscar cuatro tuercas y quitar cuatro tornillos que, una vez este la célula en su posición en el interior, habrá que colocar de nuevo.

En el caso del aislamiento lumínico, las diferentes planchas no encajan entre sí ni existe una pieza que las una, únicamente cinta aislante negra que colocan en las diferentes uniones para mejorarlo, pero no queda aislado completamente, siempre entran resquicios de luz que pueden alterar los resultados de las medidas.

4.4 MEJORAS EN EL EQUIPO ANTERIOR

La estructura anterior se iba quedando cada vez más remota y aumentaban las dificultades a la hora de su uso, lo que dio lugar a plantearse el desarrollo de diversas mejoras. Los cambios favorecerían notablemente la utilidad y funcionamiento del equipo, centrándose en la ergonomía del sistema.

4.4.1 ZONAS DEL EQUIPO CUBIERTAS

4.4.1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

También hay que matizar el hecho de que la estructura únicamente cubra la parte donde se ubica el microscopio y el sistema de posicionamiento. Para mejorar el rendimiento del equipo, lo idóneo será taparlo por completo, sobre todo en el hecho de que los equipos láser queden a la intemperie, lo que a la larga puede ocasionar fallos debido a la suciedad que se acumula y el polvo. También es conveniente cubrirlo por medidas de seguridad por el uso del láser a la intemperie. Por otro lado el paso del rayo láser hacia la zona del microscopio quedaba solucionado mediante un agujero en la chapa lo que puede hacer pasar algo de luz al interior del sistema. En la figura 28 se puede observar la parte del equipo que quedaba al descubierto y que se cubrirá por completo en la nueva estructura.



Figura 28.- Zona donde se ubican los láseres y espejos.

4.4.1.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

El nuevo diseño cubrirá la totalidad del equipo, para evitar la luz en el interior, que puede alterar las medidas. Quedará el sistema completo en el interior de la nueva cubierta, lo que facilitará el paso del rayo láser hacia el microscopio. Dentro de la nueva cubierta también quedarán diferenciadas las dos partes del equipo, cada una de ellas tendrá diferentes accesos al interior, que se tratara de diferentes puertas.

4.4.2 ACCESO AL INTERIOR DEL EQUIPO

4.4.2.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En el diseño de la estructura que tapa una parte del equipo, podemos observar que se trata de una serie de paneles de acero que únicamente cumplen la función de cubrir. No ha sido considerada la forma de uso del equipo, ya que es indispensable la presencia de un acceso directo al interior, debido a que a la hora de introducir la célula solar en el equipo debe quedar lo más horizontal posible, por lo que hay que introducirla con cierta precisión. En este caso se ha solventado a través de una plancha unida a la estructura mediante 4 tornillos, los cuales hay que extraer cuando sea necesario. Esta labor resulta innecesaria a la vez que dificultoso, por lo que es un punto importante a mejorar dentro del diseño de la estructura.

El objetivo principal que debe cumplir la nueva estructura es presenciar diferentes puertas que faciliten el acceso rápido y manejable al interior.

4.4.2.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

El nuevo recubrimiento cumple las premisas descritas anteriormente, centrándose en dotar a la estructura de las puertas necesarias para una utilización correcta del sistema. Se decidió diseñar una estructura con 4 puertas en total.

Diferenciaremos a simple vista dos zonas de la estructura:

- Zona 1: donde se ubican los dos láseres y los diferentes espejos que los focalizaran. Es necesario acceder a esta zona por todos sus lados, por lo que esta parte posee dos puertas en L. Esta forma específica facilitará la entrada creando dos puertas, una en cada lateral de la caja, como se muestra en la figura 30. Ambas puertas se abren hacia arriba dejando una amplia zona descubierta.
- Zona 2: en esta parte se encuentra el microscopio, el sistema de posicionamiento y el soporte para la célula solar. Las zonas que deben ser accesibles en este caso son dos de los laterales. Se ubican dos puertas, una en cada lateral, con una apertura hacia abajo, de forma que cuando estén abiertas se pueda observar con claridad del interior del equipo y la puerta no obstaculice.

4.4.3 AISLAMIENTO LUMÍNICO

4.4.3.1 MOTIVACION Y OBJETIVOS

El aislamiento lumínico es una premisa de gran importancia y a tener en cuenta dentro del diseño de la nueva estructura. En este caso no se ha resuelto satisfactoriamente, ya que los paneles no encajan entre sí y los puntos donde la luz penetra hacia el interior se han solucionado con cinta aislante. El problema persiste en algunas zonas y se agrava con el uso ya que se deteriora el adhesivo de la cinta y acaba accediendo mayor cantidad de luz, lo que dificulta el correcto funcionamiento del equipo.

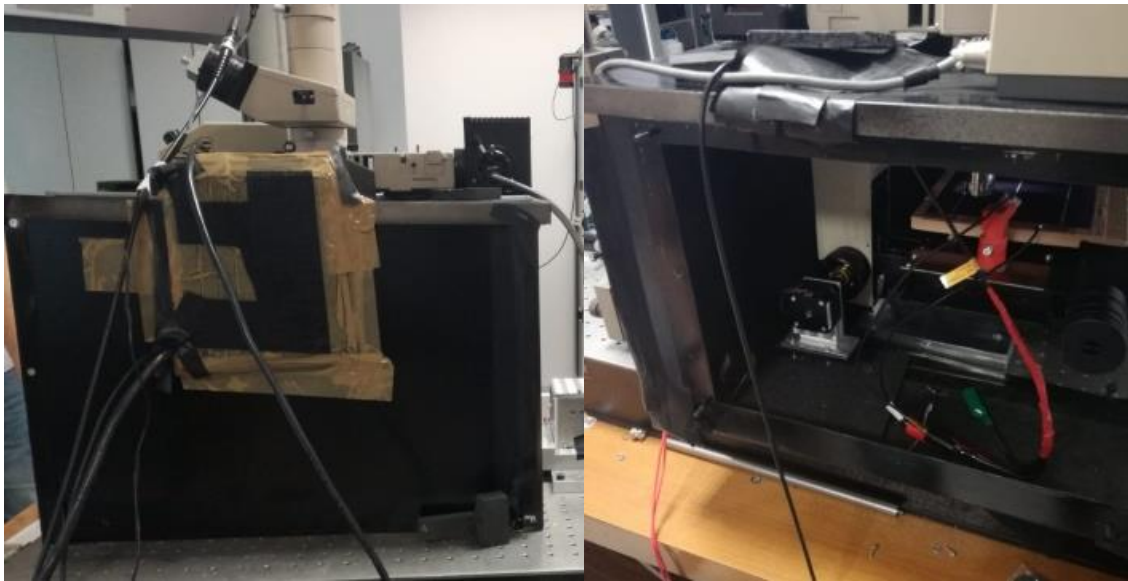


Figura 29.- Unión de las piezas de la estructura de recubrimiento mediante cinta y confuso paso de los cables.

Cumplir con el propósito de aislar completamente el sistema lumínicamente es el objetivo de la nueva estructura, utilizando materiales y formas que encajen perfectamente entre sí, y sellando todas las cavidades adecuadamente con silicona.

4.4.3.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

En el diseño de la estructura se estudiarán detalladamente los materiales y formas de los perfiles y paneles que la componen. Primero se desarrolla la forma de la estructura completa, compuesta por dos cajas unidas. Para la fabricación diferenciaremos dos elementos:

- **PERFILES:** En este caso los perfiles que más se adecúan a este diseño son de aluminio anodizado de 30x30mm de sección, de diferentes medidas de largo según el lugar en el que vayan colocados. La elección de este material se debe a la buena relación que presenta entre su peso y resistencia, lo que permite construir una estructura ligera y a la vez compacta y resistente.

- **PANELES:** se trata de planchas de 2mm de espesor, de PVC. La tonalidad será negra para asegurar un mayor aislamiento del equipo y evitar que se produzcan reflejos, ya que podrían modificar el resultado obtenido por el equipo.

Se han elegido estos dos tipos de piezas ya que mediante su acoplamiento quedara correctamente encerrado todo el interior del equipo. Se colocan los paneles insertados en las ranuras de los perfiles, de tal forma que encajan completamente.

4.4.4 ADAPTACION A LA FORMA DEL EQUIPO

4.4.4.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Otro punto a tener presente son las dimensiones del equipo, ya que en la zona superior del mismo rebasa gran parte del microscopio, que debe quedar fuera del cerramiento, como se puede observar en la figura 30. Para resolver este problema en el equipo antiguo, el panel superior de la estructura está formado por unión de diferentes piezas, que no quedan encajadas entre sí. Este hecho afecta al equipo, aparte de ser un problema en el paso de luz, también al riesgo de desmontarse en cualquier momento.

El principal objetivo del cerramiento es diseñar paneles que se acoplen a la forma del microscopio, creando un sistema para el fácil montaje sin necesidad de desarmar el microscopio, sino con un panel que se ajuste perfectamente a la forma redondeada de éste.

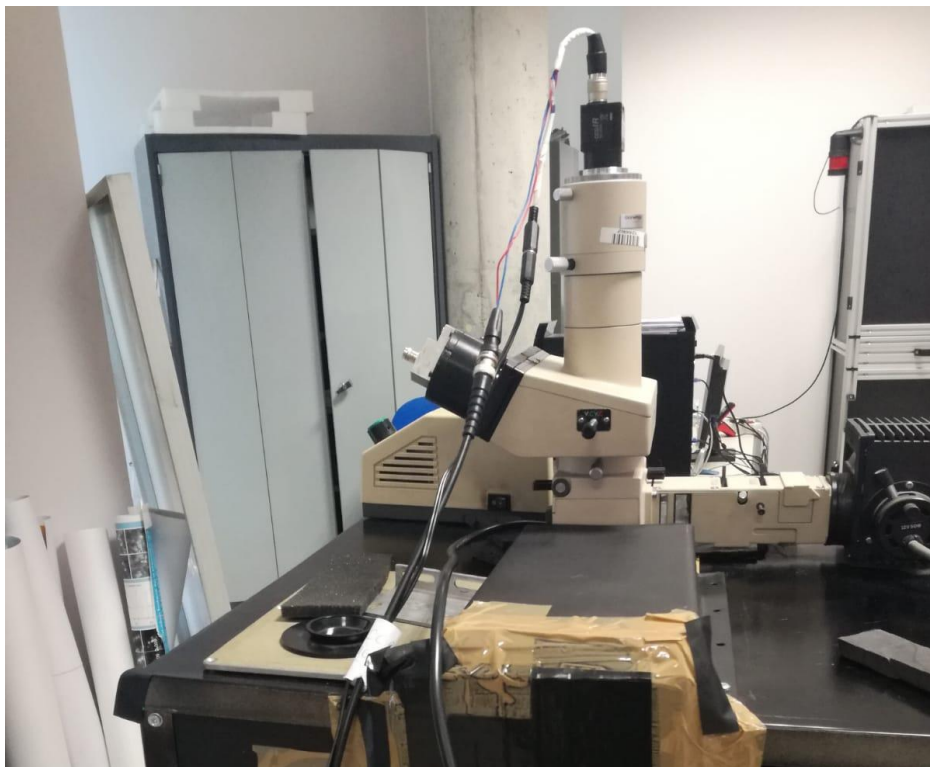


Figura 30.- Estructura antigua con la parte del microscopio que queda en el exterior

4.4.4.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

La solución es crear un estilo de panel diferente en la zona por la que sobresale el microscopio, teniendo en cuenta el perfecto encaje con una pieza cilíndrica que forma parte de ello. Para solucionarlo se diseña un panel con un agujero en forma circular del diámetro del microscopio. También es necesario que el panel esté dividido en dos que se acoplen perfectamente entre sí con una pieza de silicona negra que aísla lumínicamente toda la parte del microscopio.

4.4.5 ENTRADA DE CABLES

4.4.5.1 MOTIVACION Y OBJETIVOS

Cabe destacar de igual manera el paso de la entrada de los cables al interior del equipo. En el cerramiento existente se ha resuelto de forma compleja, sin seguir un orden, lo que da sensación de confusión y obstaculiza en algún caso el uso del equipo, como puede observarse en la figura 31.

La premisa a cumplir en el nuevo diseño es incluir un sistema de entrada de cables para realizarlo de la forma más organizada posible, evitando que ocupen sitio dentro del equipo y manteniendo el completo aislamiento lumínico del interior.

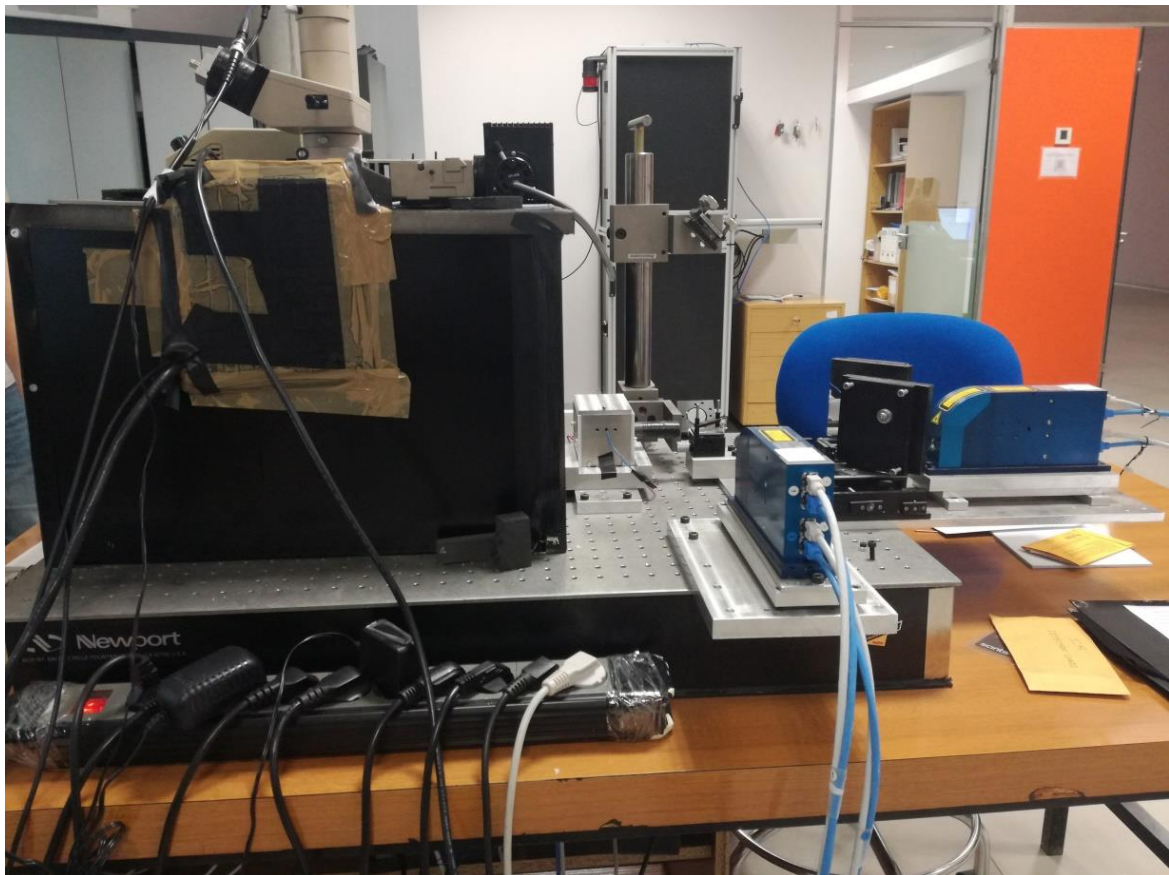


Figura 31.- Salida de cables del equipo de forma compleja.

4.4.5.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

Para solventar la entrada del cableado se ha propuesto incorporar un sistema de pasamuros manteniendo el interior aislado lumínicamente. En este caso el total de cables que es necesario comunicar son 13.

Dividiremos los cables en diferentes grupos según el lado de la estructura donde estén ubicados. En la parte A podemos observar 10 cables, 2 de ellos de menor grosor, y en la parte B 3 cables. De esta forma la estructura posee 2 pasamuros, uno en cada zona de la estructura, localizados en 2 de las planchas de la estructura que no forman parte de ninguna puerta de acceso. Podemos observar en la figura 32 un ejemplo de pasamuros similar.



Figura 32.- Pasamuros para un conjunto de 10 cables

4.4.6 MONTAJE

4.4.6.1 MOTIVACION Y OBJETIVOS

Por último otra de las desventajas de esta estructura es a la hora del montaje y desmontaje. Resulta casi imposible el hecho de retirar todas las piezas y volver a colocarlas en su misma posición. Esta acción debería carecer de dificultad en el momento de trasladar la estructura o modificar una pieza debido a fallos.

4.4.6.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

Solucionaremos las dificultades de montaje utilizando en la fabricación de la estructura piezas acoplables entre sí. Únicamente necesitamos dos tipos de piezas: planchas de PVC y perfiles de aluminio. Las planchas quedaran encuadradas en diferentes perfiles, teniendo así por cada plancha rectangular, cuatro perfiles metálicos.

El montaje de estos paneles será sencillo, ya que se desliza el panel por las ranuras del perfil y queda encajado perfectamente, lo que ayudara también con el aislamiento lumínico. El panel y los perfiles quedaran encajados entre sí como se muestra en la Figura 33.

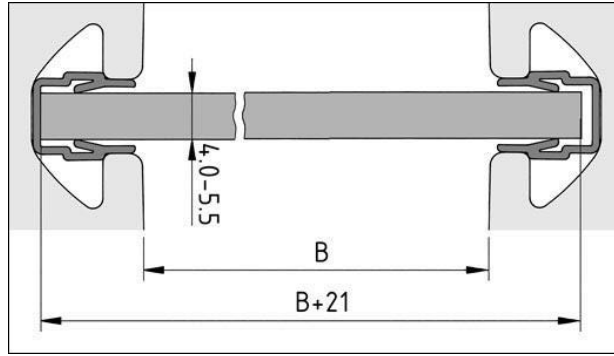


Figura 33.- Ensamble entre panel y perfil (izquierda) y sección del perfil (derecha).

En el caso de unión entre perfiles se ensamblan entre sí fácilmente, figura 36, y ofrecen versatilidad a la hora de acoplar cualquier tipo de elemento sobre ellos como serán las bisagras y los tiradores.

4.4.7 MESA DE APOYO

4.4.7.1 MOTIVACION Y OBJETIVOS

Siguiendo el mismo procedimiento que con la estructura que cubre el equipo, se vio necesario rediseñar la mesa de apoyo de todo el equipo consiguiendo una armonía del sistema completo y mejorando las prestaciones de dicha mesa.

Uno de los requisitos principales es controlar las vibraciones del suelo para un funcionamiento correcto del equipo. La mesa convencional de madera no es adecuada para cumplir esta función por lo que es necesario un diseño nuevo, como se puede observar en la figura 34.

También debe soportar el peso completo de la estructura y del equipo con todos los componentes físicos, 80 kilogramos aproximadamente, por lo que habrá que diseñar detalladamente la forma de la mesa. Debe incluir un apoyo principal para la mesa óptica y un panel donde residan los componentes de control del equipo.

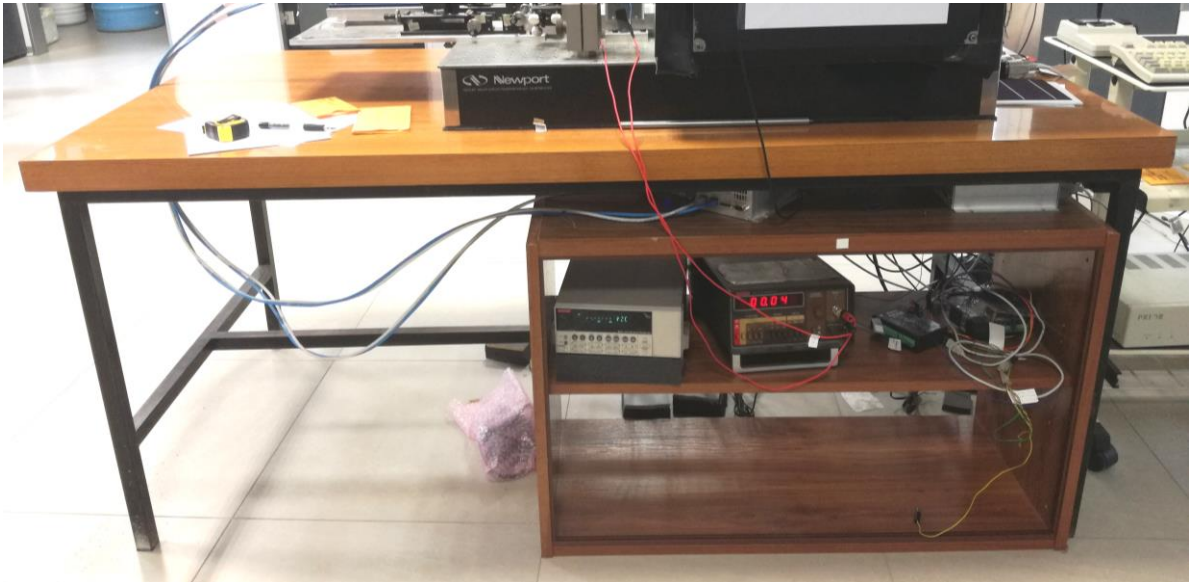


Figura 34.- Mesa convencional utilizada en el equipo anterior

4.4.7.2 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS

La nueva mesa diseñada está formada por perfiles metálicos y paneles plásticos, así como la estructura anterior. Está formada por 4 puntos de apoyo que soportan el peso de toda la estructura. También es necesario incorporar una balda para ubicar los equipos de control como son fuentes de alimentación, amplificador, fotosensor y controlador.

La altura de la mesa es de 200mm, altura accesible para hacer uso del equipo fácilmente. Se ajusta a las medidas de la estructura para conseguir un aspecto visual más uniforme de todo el equipo.

5. EQUIPO NUEVO

En este apartado se describe detalladamente la nueva versión de la estructura, llevando a cabo todas las premisas desarrolladas anteriormente y solucionando los múltiples problemas que se han planteado. El nuevo sistema diseñado es más sofisticado y versátil, facilitando el uso del equipo.

5.1 ESTUDIO DE MERCADO

En este apartado se estudiarán diferentes propuestas presentes en el mercado actual similares a la idea que se desarrolla en este TFG. Las estructuras formadas por perfiles metálicos y paneles plásticos están destinadas a diversas utilidades:

- **Cerramientos de seguridad:** para protección de maquinaria industrial frente a peligros mecánicos. Se trata de uniones entre perfiles y rejillas metálicas, a través de las que se puede supervisar el funcionamiento de la maquinaria protegiendo al operario de posibles fallos. Dejan la máquina rodeada, cubriendo únicamente los laterales.



Figura 35.- Cerramiento de seguridad.

- **Protecciones de maquinaria:** recubriendo la máquina por completo, además de proteger por seguridad la máquina, también evita la producción de fallos por agentes externos que influyen en el correcto funcionamiento del sistema, como puede ser la luz o la suciedad del ambiente. Estas protecciones están formadas por perfiles metálicos y paneles plásticos o metálicos.



Figura 36.- Protecciones de maquinaria.

▪ **Bastidores de máquina:** estructuras rígidas formadas únicamente por perfiles metálicas cuya función es soportar el motor y los mecanismos de una máquina, creando un enlace entre ellos.

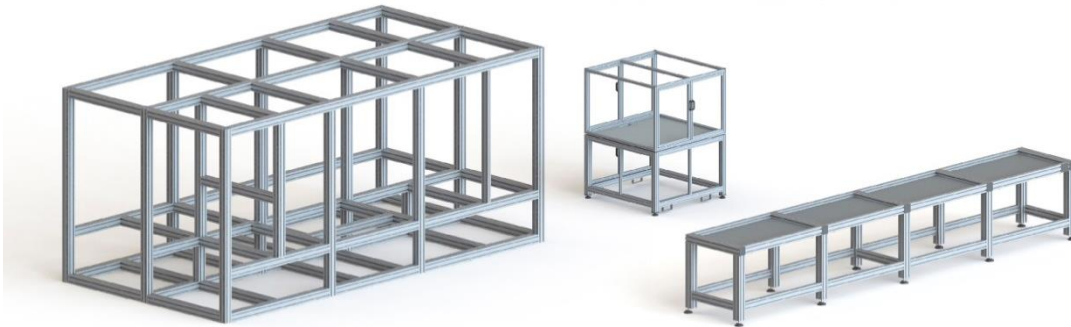


Figura 37.- Bastidores de máquinas.

▪ **Plataformas y superficies de trabajo:** fabricadas con perfiles metálicos y chapas que cumplen la función de ser la base sobre la que residen maquinaria industrial y piezas.

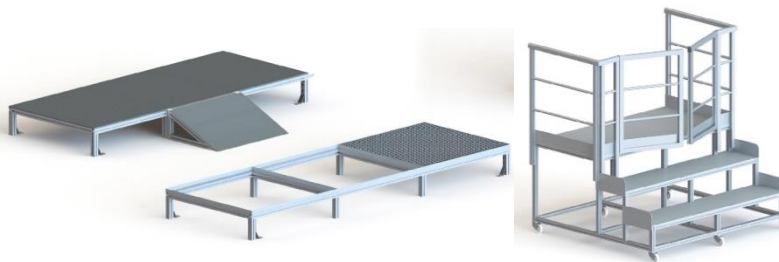


Figura 38.- Plataformas y superficies de trabajo.

▪ **Carros de apoyo:** creados con perfiles metálicos y planchas metálicas o plásticas, utilizados en el transporte de piezas, herramientas o máquinas de pequeñas distancias dentro de una misma fábrica.



Figura 39.- Carros de apoyo.

5.2 SOLUCIONES ALTERNATIVAS

Tras el análisis conceptual basado en el estudio de mercado comenzamos con el diseño conceptual. Constará de un carrito de propuestas, sobre las que se quiere llegar a la definición detallada:

5.2.1 BOCETOS

Los primeros bocetos de la estructura realizados se centraban en diseñar una única caja que mantenga todo el equipo dentro. No se valoraba la idea de diseñar una nueva mesa donde reside todo el equipo, únicamente la estructura de perfiles y paneles que recubre el sistema LBIC.

Boceto 1:

En esta primera idea no se diferencian las dos partes del equipo, la parte de los laser y espejos y la parte del microscopio y la mesa de posicionamiento. Para acceder al interior se dispone de una sola puerta, que será insuficiente para el correcto funcionamiento del equipo, por lo que esta opción será descartada.

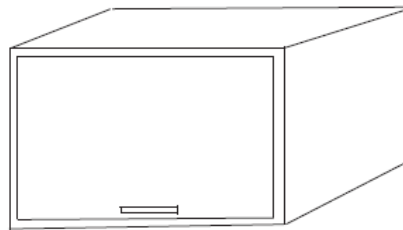


Figura 40.- Boceto 1.

Boceto 2:

Esta idea mejora la anterior, ya que posee mayor número de puertas que facilita el uso del equipo, pero siguen siendo insuficientes y también es necesario la presencia de un conducto de paso de cables dentro de la cubierta, esta opción también será descartada.

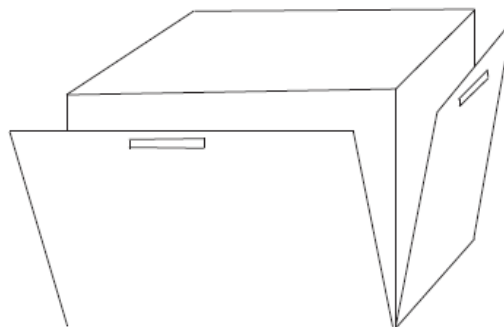


Figura 41.- Boceto 2

Boceto 3:

La siguiente idea se asemeja más a la escogida pero contiene fallos como el escaso número de puertas, únicamente dos a las que habría que añadir otras dos como mínimo para poder acceder cómodamente a todas las partes del equipo en el interior. Esta estructura tiene la misma dimensión de alto en todo el conjunto, lo que tendría que variar ya que el microscopio tiene que mantener unas dimensiones límite y la parte de los espejos otra dimensión diferente, hay que diferenciar las dos partes del equipo. Esta idea queda descartada.

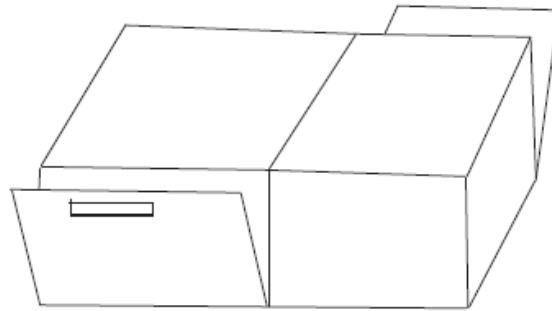


Figura 42.- Boceto 3.

5.2.2 MODELOS 3D

Las primeras ideas que surgieron cumpliendo las premisas de la nueva estructura dejaban dos partes diferenciadas dentro del equipo, separándolas por un panel. Este modelo, Figura 43, está formado por dos cajas separadas coincidentes en una de las caras, cuyas dimensiones se acoplan perfectamente a la forma del equipo.

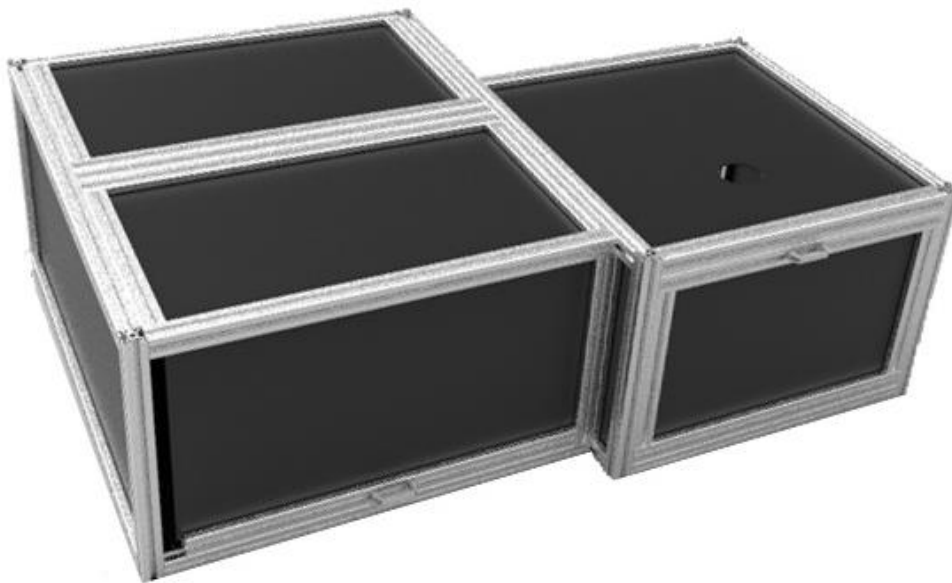


Figura 43.- Imagen del primer diseño de la estructura.

Esta estructura visualmente no aporta una armonía de formas y tamaños por lo que no formara el diseño final. Se realizaran modificaciones y mejoras a esta estructura solventando los problemas y eliminando puertas y paneles innecesarios para su correcto funcionamiento.

Los cambios realizados en esta estructura fueron:

- Eliminar la diferenciación de las dos partes dentro del equipo, creando una única caja que acoja el conjunto del equipo. Esto facilita el paso del láser dentro del sistema.
- En la caja de menos tamaño quedaban localizadas 3 puertas, una de ellas no es necesaria por lo que nos quedaremos con 2, localizadas en los laterales de ésta.
- Modificar la forma final de la estructura a un único prisma rectangular.

En los apartados siguientes se exponen los detalles de la nueva estructura desarrollada y los componentes, así como el funcionamiento a la hora de realizar las medidas dentro de la célula solar.

5.3 CARACTERISTICAS

Este nuevo equipo se centra en mejorar la funcionalidad del equipo para obtener óptimos resultados y facilitar al usuario a la hora de ponerlo en funcionamiento. En el siguiente apartado se tratan aspectos relacionados con el proceso de diseño del nuevo equipo.

En la figura 38 se puede observar la imagen del exterior de la estructura diseñada con CATIA v5. Se puede apreciar en la figura que consta de dos partes la estructura:

- La cubierta: situada en la parte superior, que cubre el sistema LBIC. A través de esta cubierta y mediante una estructura dotada de diferentes puertas será accesible la zona interior del equipo.
- La mesa: donde reside la cubierta, la mesa óptica y el sistema LBIC. Esta mesa eleva todo el equipo del suelo una distancia de 90cm, que facilita el uso del sistema, y sirve de control para las vibraciones del suelo.

Esta nueva estructura consta de una composición de paneles de PVC y perfiles de aluminio que encajan creando una estructura que cubre el sistema LBIC y facilita el funcionamiento de la misma. A continuación se presentan los componentes detalladamente.

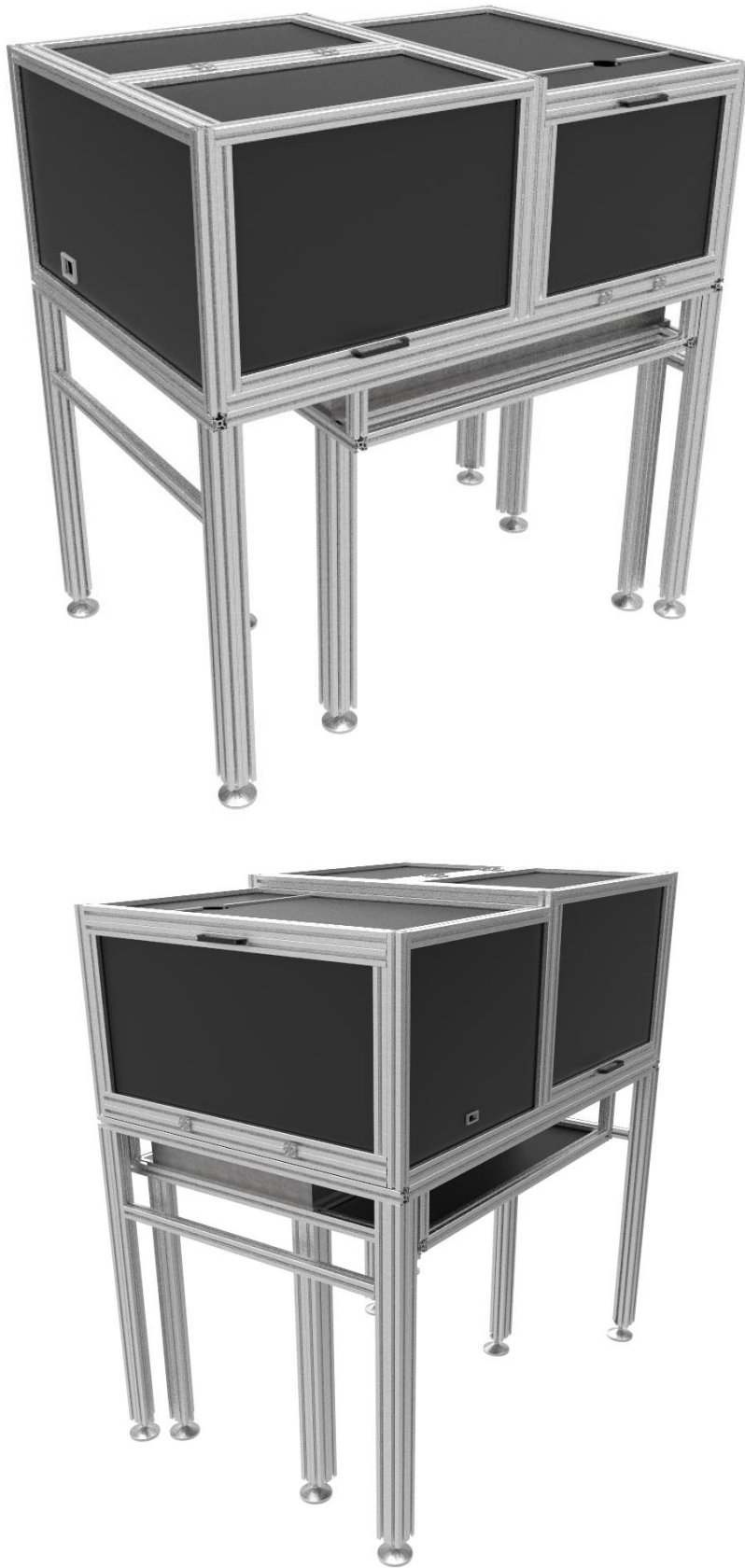


Figura 44- Vistas principales de la nueva estructura completa.

5.4 COMPONENTES

5.4.1 PERFILES METALICOS

La estructura completa está formada por un conjunto de 82 perfiles ranurados de aluminio anodizado de diferentes longitudes, que se adquieren en la empresa Fasten Sistemas. Todos los perfiles tienen una sección de 30x30mm.

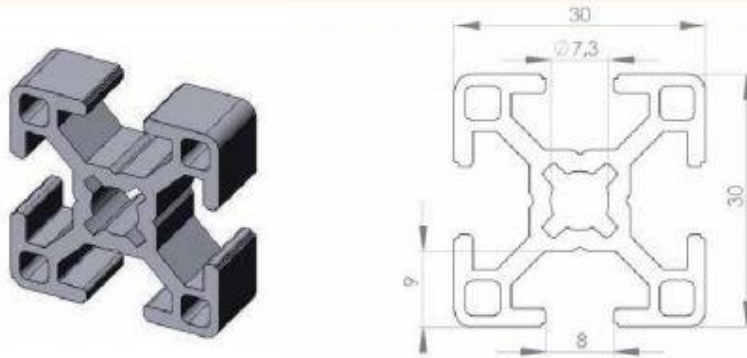


Figura 45.- Sección de los perfiles de la estructura.

El material elegido es el aluminio debido a su resistencia y bajo peso, se adecúa perfectamente a la estructura compacta que se va a construir. El conjunto de los perfiles se divide según las dos partes mencionadas anteriormente. Para la estructura de la cubierta utilizaremos 39 perfiles y para la mesa el resto, 42 perfiles.



Figura 46.- Conjunto de la estructura formada por perfiles ranurados.

La principal característica de la forma de estos perfiles es la facilidad para ensamblarlos entre sí Figura 47 y la versatilidad para acoplar diferentes elementos sobre ellos, como son asas y bisagras que se muestran más adelante.

La forma de unión entre perfiles y paneles es viable debido a las ranuras de los perfiles sobre las que se desliza el panel y queda encajado. Estas cualidades hacen que el montaje y desmontaje de la estructura sea sencillo y rápido, pensando también en la hora de hacer alguna modificación dentro de la estructura.



Figura 47.- Unión entre perfiles.

El conjunto de la estructura presenta medidas de 1287mm de alto, 1253mm de ancho y 846mm de profundidad. El resto de medidas quedan detalladas en los planos (Anexo 1).

5.4.2 CERRAMIENTOS

Está compuesto por un conjunto de paneles de PVC de un espesor de 2mm que unidos a los perfiles metálicos descritos anteriormente, aislamos el sistema LBIC lumínicamente del exterior. El conjunto en total son once paneles, Figura 48, diez de ellos ubicados en la zona de la cubierta y uno de ellos en la mesa, cuya función es hacer de base para elementos de control del sistema.

Todos los paneles poseen una tonalidad negra que favorece el aislamiento y evitan la producción de reflejos que pueden alterar el resultado de las medidas. Todos los paneles quedan fijados a los perfiles fácilmente deslizándolos por las ranuras y cada panel queda enmarcado en 4 perfiles.

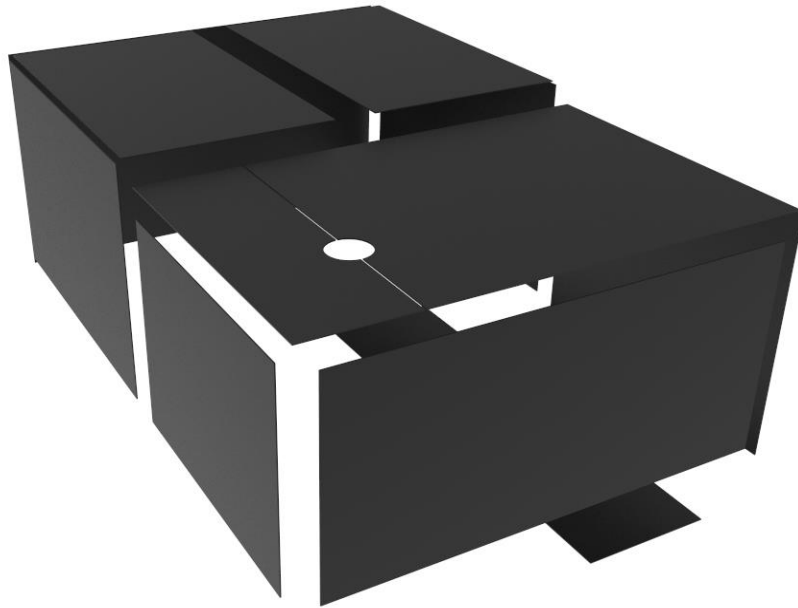


Figura 48.- Conjunto de paneles.

En el caso de las cuatro puertas de las que consta la estructura, el sistema de unión es similar, ya que también es importante el aislamiento lumínico en esas zonas de la estructura. Para ello se colocan dos piezas metálicas en el cerramiento de las puertas para evitar que se abran.

Uno de los paneles queda localizado en la parte superior del microscopio. La parte superior del microscopio queda fuera de la estructura, por lo que para evitar desmontarlo hemos solucionado el problema dividiendo uno de los paneles en dos , Figura 49, creando un agujero en el medio y uniéndolos entre sí mediante una goma que evita posibles entradas de luz.

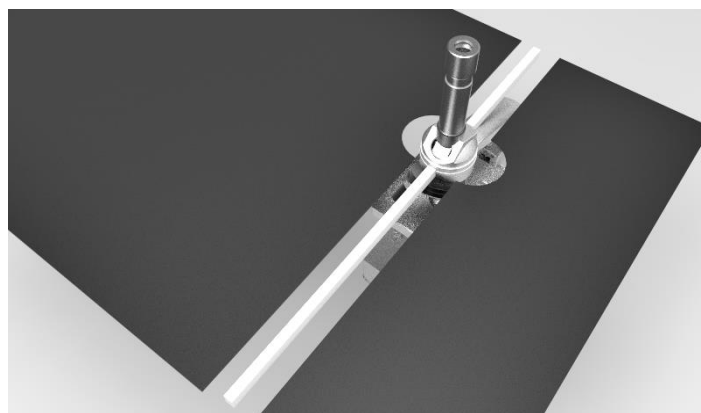


Figura 49.- Panel y goma de unión en la zona del microscopio.

5.5 ACCESORIOS

Además de los componentes principales, perfiles y cerramientos, la estructura cuenta con elementos de unión y funcionales para facilitar el correcto funcionamiento del equipo.

5.5.1 PUERTAS

La estructura dispone de un total de cuatro puertas de acceso al interior del equipo. Podemos diferenciar entre ellas dos tipos según la forma que tienen. El conjunto de todas las puertas abiertas se puede observar en la Figura 50.



Figura 50.- Apertura del conjunto de puertas.

▪ PUERTA CON APERTURA HACIA ABAJO:

En este caso las dos puertas están situadas en la zona donde se encuentra el microscopio y el sistema de posicionamiento de la célula solar.

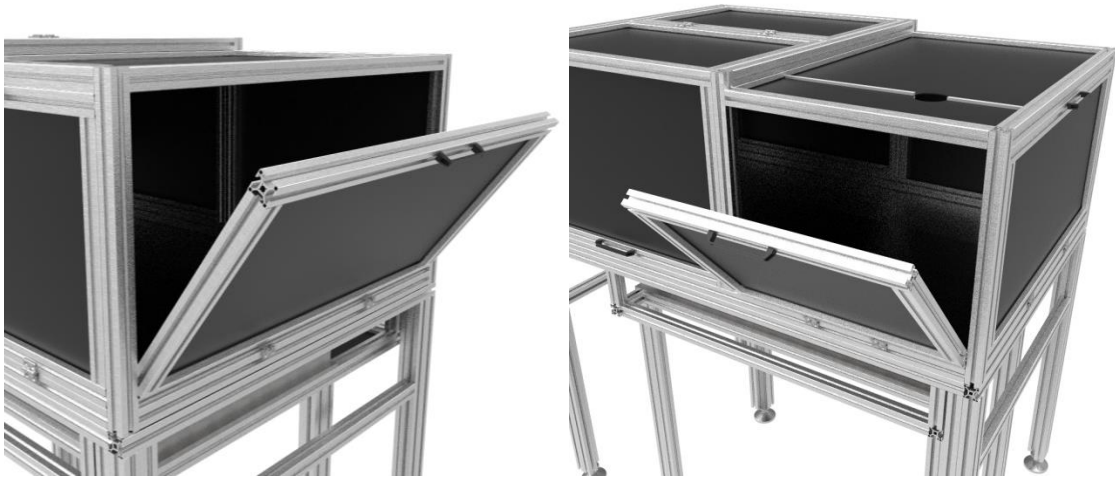


Figura 51.- Puerta lateral (izquierda) y frontal (derecha) abiertas.

Estas dos puertas hacen toda esa zona completamente accesible desde todos los laterales, ya que están situadas en los dos lados de la estructura que más uso se van a dar para el funcionamiento, ya que es por donde se introduce la célula. En este caso las puertas tienen diferentes dimensiones entre sí, la puerta del lateral es más grande y ocupa toda la profundidad de la estructura.



Figura 52.- Apertura de las dos puertas.

▪ **PUERTA en "L":**

Este tipo de puerta se caracteriza por su peculiar forma en "L", que facilita el paso al interior ya que desde una misma puerta se puede acceder por la parte superior y por el frente. De este tipo de puerta encontramos dos localizadas en la parte donde se ubican los equipos láser y los espejos. Se muestra en la figura 53 el espacio que queda abierto al girar esta puerta.



Figura 53.- Apertura puerta en "L".

También se valora la opción de abrir las dos puertas a la vez, para ello en los perfiles de las esquinas van incluidas unas piezas magnéticas que permiten la apertura simultánea.

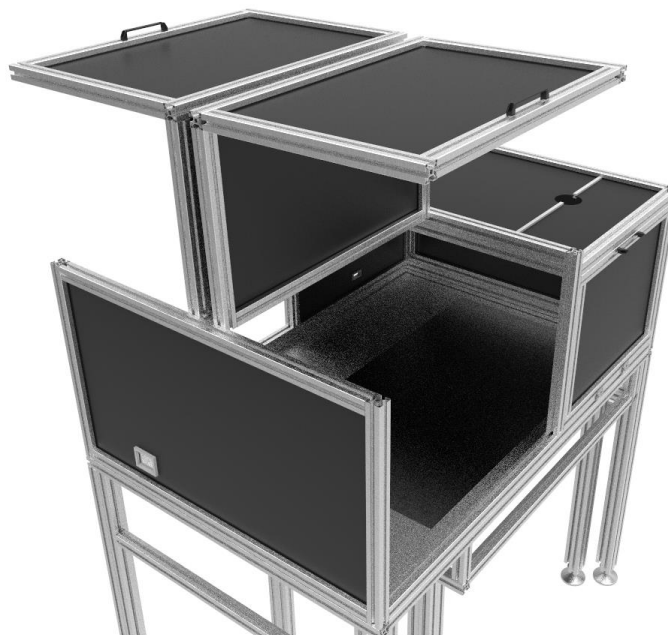


Figura 54.- Apertura simultánea de las puertas en "L".

5.5.2 BISAGRAS

Para conseguir la correcta apertura de las cuatro puertas de la estructura, es necesario incorporar dos bisagras de acero 30.30 en cada una de ellas, que hace un total de ocho, que se adquieren en la empresa Motedis. Las bisagras elegidas son de acero inoxidable y se adecuan a la forma y tamaño de los perfiles.



Figura 55.- Bisagra de acero inoxidable 30.30 (Motedis)

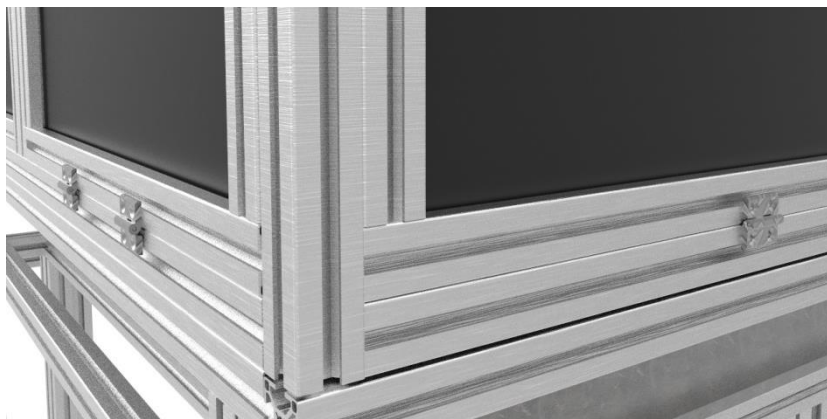


Figura 56.- Bisagras incluidas en el equipo

Estas bisagras quedan fijadas a los perfiles mediante 4 tornillos avellanados de métrica 6. Las bisagras no son desmontables para evitar fallos a la hora de abrir las puertas.



Figura 57.- Tornillos avellanados de métrica 6 (Motedis).

5.5.3 ASAS

En la apertura de las puertas es indispensable la presencia de un asa 122 donde colocar la mano para abrir correctamente la puerta, que se adquieren en la

empresa Motedis. Por ello se incluyen 4 asas, una en cada puerta. Están fabricadas en plástico PA reforzado con fibra de vidrio y con una tonalidad negra.



Figura 58.- Asa 122 (Motedis).

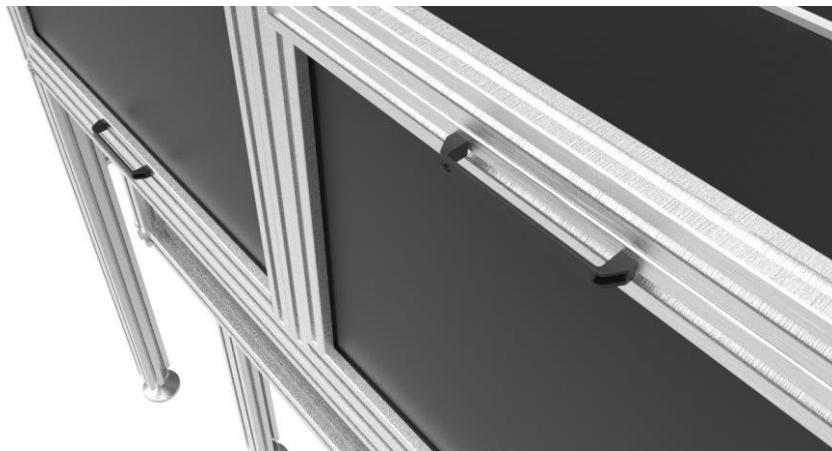


Figura 59.- Asas incorporadas en la estructura.

Quedan unidas a los perfiles mediante tornillos de cabeza hexagonal o cilíndrica, dos tornillos para cada asa.

5.5.4 PIES ARTICULADOS

Para el apoyo de toda la estructura en el suelo es necesario incluir unos pies articulados 60 varilla roscada M12x88, que se trata de un conjunto de un pie pivotante y una varilla, ambos de acero cincado, que van unidos a los perfiles mediante una rosca. La idea es retirar las baldosas del suelo técnico donde actualmente reside la mesa, y colocar la estructura sobre el hormigón para evitar las vibraciones.

Estos pies van a ser adquiridos en la empresa Motedis, y son necesarios un total de ocho pies para cada una de las patas de la mesa.



Figura 60.- Pie articulado 60 varilla roscada M12x88 (Motedis).

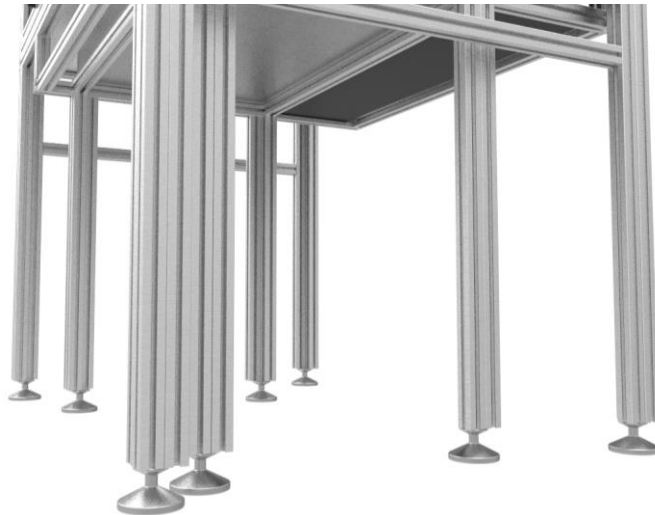


Figura 61.- Pies articulados unidos a los perfiles de la mesa.

5.5.5 PASAMUROS

En el paso de los cables del interior al exterior del equipo utilizaremos unos pasamuros. Uno de 10 cables de diferentes grosores y otro de 3. Uno de ellos en cada caja de la estructura. Son pasamuros circulares planos que se adecúan al espesor de 2mm de los paneles, fijados a contratuerca. Los pasamuros que se colocan, Figura 62, en los dos únicos paneles que no forman parte de ninguna puerta.



Figura 62.- Pasamuros.

5.5.6 MESA OPTICA

Por último cabe destacar la mesa óptica Newport M-PG-23-4-ML que es la única parte de la estructura antigua que mantenemos en esta nueva, ya que el equipo LBIC queda fijado a esta mesa, Figura 63.



Figura 63.- Mesa óptica Newport M-PG-23-4-ML.

La mesa óptica Newport tiene unas dimensiones de 900mm del largo, 600mm de ancho y 110 mm de espesor y está fabricada en acero inoxidable. Para incorporarla en la nueva estructura, queda encajada en los perfiles de la mesa los cuales dejan el hueco de la medida exacta para ubicar la mesa óptica.

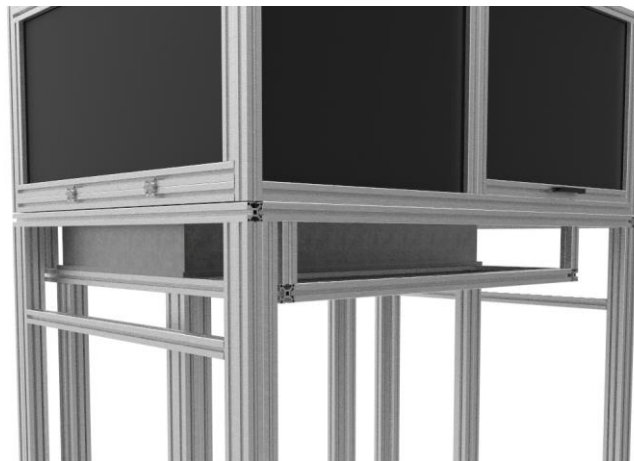


Figura 64.- Ubicación de la mesa óptica dentro de la estructura.

5.6 PROCESO DE FABRICACIÓN.

Para la fabricación de esta estructura el primer paso, previamente realizada la elección de los materiales, es proceder al mecanizado y ensamblaje de los mismos. Son materiales sencillos de mecanizar, por lo que únicamente necesitamos herramientas de corte, tanto para los perfiles metálicos como para las planchas de PVC.

5.6.1 MECANIZADO

En primer lugar comienza el corte de los perfiles metálicos de aluminio, un total de 82 perfiles que van a ser mecanizados con una sierra de corte para aluminio de avance automático, que podemos encontrar en la empresa Fasten Sistemas.

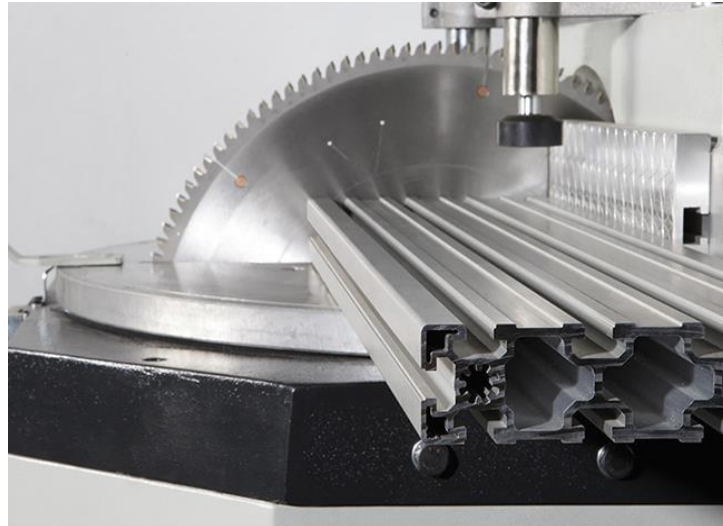


Figura 65.- Sierra de corte para los perfiles de aluminio.

Una vez realizado el corte para todos los perfiles quedarán listos para el ensamblaje creando la estructura final.

A continuación se procede también al corte de los paneles de PVC, que formarán los cerramientos de la nueva estructura. El PVC es un material fácil de manipular, resistente y flexible. Para ello se hace uso de una sierra vertical de panel, Figura 66, con la cual podremos obtener los once paneles necesarios para el montaje de la estructura. Este proceso de fabricación lo lleva a cabo la empresa Fasten Sistemas.

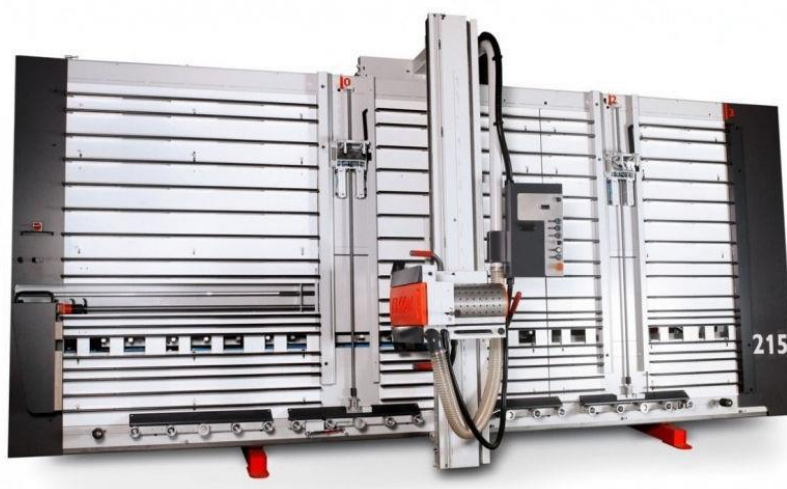


Figura 66.- Sierra de vertical de panel.

Después de obtener los perfiles metálicos y los paneles de PVC con las medidas exactas necesarias, se procede al montaje de la estructura.

5.6.2 MONTAJE

A continuación el siguiente paso en la fabricación de la nueva estructura es el montaje de los perfiles y los paneles y de los accesorios que incluye el sistema. Comienza el proceso encajando perfiles con perfiles y paneles con perfiles siguiendo el orden correcto en el ensamblaje. En el caso de la unión de los perfiles metálicos, quedan unidos mediante una pieza metálica como se puede observar en la Figura 62.



Figura 67.- Método de unión de perfiles.

Y en el caso del ensamblaje entre los perfiles de aluminio y los paneles de PVC se realiza colocando una pieza de goma entre ellos para mantenerlos fijados entre sí y deslizar el cada panel por las ranuras de los perfiles en los que quedan enmarcados.



Figura 68.- Unión perfil y panel con la goma de fijación.



Figura 69.- Panel y perfil unidos junto con la pieza de goma.

Finalizando con el montaje de la estructura, una vez colocados el total de perfiles y paneles, se procede a atornillar elementos como las bisagras, Figura 64, las asas y los pies articulados.



Figura 70.- Bisagra atornillada al perfil de aluminio.

Con la incorporación de estos elementos, debemos introducir el equipo entre la cubierta y la mesa y finalizar fijando estas dos partes de la estructura. Una vez realizado queda terminada la nueva estructura.

6. CONCLUSIONES

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar una nueva estructura que sustituya a la actual que recubre el equipo LBIC presente en el laboratorio, y que favorezca el correcto funcionamiento del sistema y facilite su utilización. Después de realizar el diseño de la nueva estructura concluimos:

- La nueva estructura de la cubierta aísla completamente el equipo de la luz, lo que mejora el rendimiento al obtener las mediciones de las células solares.
- Se ha diseñado una mesa que aísla al equipo de vibraciones del suelo, lo que reduce el ruido que puede alterar las medidas realizadas. También permite unificar visualmente la estructura compuesta la cubierta y la mesa, ya que siguen los mismos procedimientos de fabricación, materiales y las dimensiones se acoplan perfectamente.
- Se han incorporado un conjunto de puertas que facilita el acceso al interior del equipo, que simplifica el funcionamiento del sistema a la hora de introducir la nueva célula solar y reduce el tiempo en realizar esta tarea.
- Los materiales de la nueva estructura, fabricada con perfiles de aluminio y cerramientos de PVC, hacen de esta una estructura ligera y resistente, que facilite el movimiento y el desmontaje.

7.REFERENCIAS

- LIBROS:

[1] **Balenzategui Manzanares, J L.** *Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar.* s.l.: Escuela de Organización Industrial, 2007.

[2] **Moralejo Ochoa, B.** *Desarrollo y optimización de sistemas de corrientes inducidas ópticamente y de imágenes de luminiscencia para la caracterización de células fotovoltaica:* Universidad de Valladolid, 2015.

[3] **Ponce Alcántara, S.** *Células solares de silicio: Fundamentos y Aplicaciones,* 2008.

[4] **Moretón Fernández, A.** *Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio.* s.l. : Universidad de Valladolid, 2016.

[5] **Bou-Ras, D., Kirchartz, T.,Rau, U.** *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells.* s.l. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2011.

[6] **Anta Fernández, J.** *El silicio solar.* s.l. : Asociación de la energía fotovoltaica, 2005.

- PAGINAS WEB:

[7] ENLIGHT: *Células solares.* Disponible en:< <https://www.enlight.mx/blog/celulas-solares-tipos/> >
[Última consulta: 15/08/2018]

[8]SALVAPONCE: *Células solares de silicio: Fundamentos y aplicaciones.* Disponible en: <<https://salvaponce.files.wordpress.com/2008/11/celulas-solares-de-silicio.pdf>>
[Última consulta: 19/08/2018]

[9]BRITANNICA: *Solar cell Electronics.* Disponible en: <<https://www.britannica.com/technology/solar-cell>>
[Última consulta: 22/08/2018]

[10] MOTEDIS: *Asa 152.* Disponible en: <<https://www.motedis.es/shop/BasicosMecanica/Asas/Asas/Asa-152::999991349.html>>
[Última consulta: 28/08/2018]

[11] MOTEDIS: *Bisagra de acero inoxidable 30.30* Disponible en: <[https://www.motedis.es/shop/Basicos-Mecanica/Basicos-Aceroinoxidable/Bisagra-de-acero-inoxidable_3030::9999_91314.html](https://www.motedis.es/shop/Basicos-Mecanica/Basicos-Aceroinoxidable/Bisagra-de-acero-inoxidable/Bisagra-de-acero-inoxidable_3030::9999_91314.html)>
[Última consulta: 28/08/2018]

[12]THORLABS: *Optical Enclosures.* Disponible en: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=45>
[Última consulta: 25/08/2018]

[13] FASTEN: *Elementos de posicionamiento.* Disponible en: <<http://www.fasten.es/>>
[Última consulta: 28/08/2018]

[14] FASTEN: *Perfiles de Aluminio.* Disponible en: <<http://www.fasten.es/>>
[Última consulta: 28/08/2018]

[15] MOTEDIS: *Perfil ranurado Standard*. Disponible en: <https://www.motedis.es/shop/table_cats.php?tGroup_id=4 >
[Última consulta: 28/08/2018]

[16] NEWPORT: *Precision Grade Modal Damped Optical Breadboard*. Disponible en: <https://www.newport.com/f/pg-modal-damped-top-performance-breadboards>
[Última consulta: 22/08/2018]

[17] KOLBI: *Pasamuros para cables*. Disponible en: <<https://www.kolbi.es/pasamuros-prensaestopas-apantallamiento-emc/pasamuros-para-cables/no-conectorizados/50532>>
[Última consulta: 23/08/2018]

- CONTENIDOS DE ASIGNATURAS CURSADAS DURANTE EL GRADO DE INGENIERÍA EN DISEÑO INDUSTRIAL:

Dibujo industrial

- AENOR [ed.lit]/ Dibujo técnico. Normas básicas.
- M^a del Mar Espinosa, Manuel Domínguez / Fundamentos de dibujo técnico y diseño asistido
- Apuntes de la asignatura

Materiales

- INGENIERÍA Y PROYECTOS INDUSTRIALES - Autor: Andrés Díaz, J.R. - Editorial: Universidad de Málaga
- Apuntes de la asignatura.

Procesos industriales

- Apuntes de la asignatura

II. ANEJOS

ANEJO 1. PLANOS

Plano 00.- Plano de conjunto Equipo LBIC

Plano 01.- Estructura mesa

Plano 02.- Estructura cubierta

Plano 03.- Puerta en "L"

Plano 04.- Puerta frontal

Plano 05.- Puerta lateral

Plano 06.- Cerramientos

