



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño de un prototipo de soporte mecánico
para la realización de medidas de
Electroluminiscencia en plantas
fotovoltaicas**

Autora:

Gómez Escorial, Teresa

Tutores:

González Rebollo, Miguel Ángel

Martínez Sacristán, Óscar

**Dpto. Física de la Materia
Condensada, Cristalografía y
Mineralogía**

Valladolid, Julio de 2017.





Agradecimientos

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

A mis TUTORES, Dr. Miguel Ángel González Rebollo y Dr. Óscar Martínez Sacristán, por su apoyo y dedicación recibidos durante la elaboración del proyecto, ya que sin ellos no habría sido posible su realización. Así mismo, agradecerles la oportunidad de realizar este proyecto, con el que tanto he disfrutado y aprendido.

Al Grupo de Semiconductores Optronlab, por el apoyo y buen trato recibido, que han hecho que la realización de este trabajo haya sido más llevadera.

A mi FAMILIA, a mi padre Luis Gómez, a mi madre Belén Escorial y a mi hermano Álvaro Gómez, por todo el cariño y ayuda que me han dado a lo largo de estos años, y sin los cuales no podría haber llegado hasta aquí.

A mis AMIGOS, que han compartido de cerca, o no tan cerca, todo el transcurso de esta carrera, y que han hecho que a pesar de las dificultades, haya sido una buena etapa.

Y en general, a todo aquel que de una manera u otra ha participado en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.





ÍNDICE

CAPÍTULO 1.	Resumen y palabras clave	7
CAPÍTULO 2.	Motivación y objetivos	9
CAPÍTULO 3.	Fundamentos teóricos.....	13
3.1.	Células solares.....	13
3.1.1.	Estructura células solares.....	14
3.1.2.	Funcionamiento de las células solares	15
3.1.3.	Parámetros característicos.....	17
3.1.4.	Factor de forma.....	18
3.1.5.	Eficiencia de las células solares.....	20
3.1.6.	Factores que influyen en la producción de energía de una célula solar ...	21
3.2.	MC- Si / C- Si.....	23
3.3.	Plantas de producción.....	27
3.3.1.	Paneles y strings.....	27
3.3.2.	Conexión eléctrico.....	31
3.3.3.	Dos tipos de plantas	35
CAPÍTULO 4.	Caracterización por Electroluminiscencia (EL)	39
4.1.	Técnicas de medida de células solares.....	39
4.1.1.	Fotoluminiscencia (PL)	42
4.1.2.	Imagen de Electroluminiscencia (EL).....	44
4.1.3.	Comparación de ambas técnicas.....	47
4.2.	Dispositivos de captación de luminiscencia	49
4.2.1.	Cámaras CCD de silicio e InGaAs	50
4.2.2.	Cámara con sensor CCD de silicio.....	51
4.2.3.	Cámara con sensor CCD de InGaAs	52
4.2.4.	Características principales de los detectores CCD de Silicio e InGaAs	53
4.2.5.	Proceso de medición	56
CAPÍTULO 5.	Diseño y desarrollo de un equipo de medida	59
5.1.	Equipo de medición de electroluminiscencia (EL)	59
5.2.	Distancia de la cámara a los paneles.....	63
5.3.	Prototipos realizados	65
CAPÍTULO 6.	Conclusiones y trabajos futuros.....	95
CAPÍTULO 7.	Bibliografía	97



CAPÍTULO 8. Anexos	99
Anexo 1. Cámara pco. 1300 solar.....	99
Anexo 2. Cámara InGaAs Hamamatsu photonics.....	101
Anexo 3. Estudio estructural prototipo 2.....	103
Anexo 4. Estudio estructural prototipo 3.....	111
Anexo 5. Estudio estructural prototipo 4.....	119
Anexo 6. Planos	127



CAPÍTULO 1. Resumen y palabras clave

Resumen

En el campo de la caracterización de células solares, el método de electroluminiscencia (EL), se ha convertido en los últimos años en una técnica de ensayo no destructiva muy extendida que permite una rápida detección de defectos en módulos fotovoltaicos (como cracks y microcracks, interconexiones defectuosas, etc).

Para el estudio del estado superficial de células fotovoltaicas mediante electroluminiscencia diurna, una de las tecnologías que ofrece mejores resultados es la cámara CCD de InGaAs,

Con el presente Trabajo Fin de Grado, se pretende diseñar un equipo ligero y resistente, compuesto por materiales desmontables y de fácil transporte, cuya función sea caracterizar, de forma rápida, células solares presentes en plantas fotovoltaicas mediante la técnica de electroluminiscencia diurna, obteniendo imágenes con las mínimas deformaciones posibles.

Palabras clave

Electroluminiscencia, célula solar, InGaAs, equipo de medida y caracterización.



CAPÍTULO 2. Motivación y objetivos

La obtención de imágenes mediante luminiscencia como método de caracterización de células solares, es una técnica que se ha ido desarrollando en los últimos años debido a que se trata de una técnica no destructiva, que conlleva un bajo coste, no hace falta que haya contacto con la célula y que presenta gran rapidez a la hora de caracterizar las células solares. En muy cortos espacios de tiempo se pueden obtener, mediante cámaras de tecnología CCD, imágenes de alta resolución que permiten caracterizar la muestra y visualizar posibles defectos.

La información que se obtiene a partir de esta técnica de medición permite localizar las zonas que presentan defectos en el material de partida (obleas) y detectar fallos adicionales en los dispositivos finales (células solares). Permite caracterizar las células desde el comienzo del proceso productivo hasta una vez finalizada la instalación de los paneles fotovoltaicos en las plantas fotovoltaicas. Por ello, con este trabajo, se pretende desarrollar un equipo móvil que permita caracterizar en el menor tiempo posible el mayor número de células solares que presentan las distintas plantas fotovoltaicas, para poder detectar de manera rápida qué paneles fotovoltaicos presentan células solares con defectos y que hacen que el rendimiento del panel a la hora de producir energía eléctrica se vea disminuido.

En la Imagen 1 se muestran los principales componentes de un equipo de obtención de imágenes de luminiscencia.

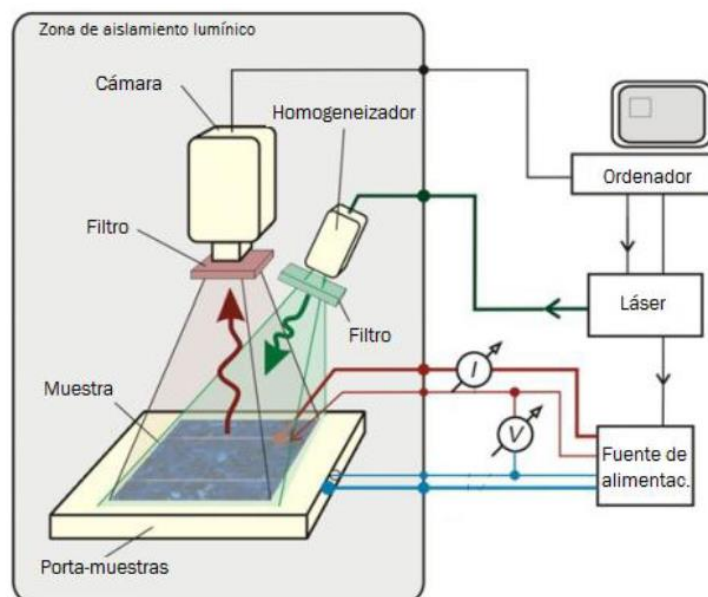


Imagen 1. Equipo de caracterización de células solares mediante electroluminiscencia y fotoluminiscencia.



El proceso consiste en excitar la muestra para que emita luz y captar ésta mediante una cámara con un sensor adecuado. La cámara envía la imagen a un ordenador donde posteriormente se procesa. La excitación se puede provocar mediante una fuente de alimentación (electroluminiscencia, EL), o bien a través de una fuente de luz (fotoluminiscencia, PL).

Resulta especialmente conveniente que todos los elementos se dispongan en un equipo compacto, para que el entorno de trabajo sea el más adecuado y el proceso de obtención de imágenes se realice de manera ágil y cómoda.

Para realizar un análisis cuantitativo y extraer parámetros físicos es necesario realizar operaciones aritméticas entre imágenes capturadas bajo diferentes condiciones operativas. Por esta razón, una buena relación señal/ruido es esencial para obtener imágenes de alta calidad. Con el fin de cumplir estos requisitos es de máxima importancia la elección de la cámara y objetivo más adecuados, así como la optimización de los parámetros de funcionamiento del resto de componentes. La distancia a la que se encuentre la cámara de los paneles solares será también de gran relevancia a la hora de poder capturar en una sola imagen un panel solar completo.

Actualmente las medidas de caracterización por electroluminiscencia que se están llevando a cabo por el grupo GdS-Optronlab, del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid, se realizan con un trípode, una cámara de InGaAs, una fuente de alimentación y un ordenador, lo cual presenta una serie de limitaciones a la hora de poder caracterizar de modo adecuado todos los paneles presentes en las plantas fotovoltaicas.

Lo que se pretende con el presente trabajo es el diseño de un prototipo que permita realizar caracterización de células fotovoltaicas por electroluminiscencia en plantas solares de manera fácil y rápida, intentando solventar los problemas que presenta el equipo de medida actual a la hora de realizar medidas de electroluminiscencia en planta.

En este trabajo se abordan los aspectos referidos al diseño de un nuevo equipo de medida, focalizando el desarrollo del diseño estructural del mismo. En concreto, y con el fin de satisfacer las necesidades técnicas del equipo actual de medida, se ha diseñado un equipo que cumpla las siguientes premisas:

- La estructura del equipo ha de ser compacta, ligera, fácil de desplazar, desmontable y ajustable a distintas medidas.
- La posición de la cámara ha de ser perpendicular a los paneles solares
- Debe permitir medir el mayor número de paneles que conforman los string



- Realizar el menor número de movimientos posibles de las diferentes partes que conforman el sistema de medida
- Facilitar el movimiento de la cámara
- El proceso de medida debe realizarse en cortos períodos de tiempo



CAPÍTULO 3. Fundamentos teóricos

En este capítulo, se hará un desarrollo de los componentes que forman las plantas fotovoltaicas, dando gran importancia a las células solares, detallando a su vez los materiales de los que pueden estar compuestas. También se diferenciará entre los tipos de plantas fotovoltaicas que hay y las conexiones eléctricas que nos podemos encontrar.

3.1. Células solares

Las células solares son el elemento principal de las instalaciones de energía solar, ya que son quienes generan electricidad.

Las células o celdas solares son las unidades estructurales de los paneles fotovoltaicos. Son dispositivos que convierten energía proveniente de la radiación solar en energía eléctrica, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química. Es un proceso en el que la luz incide sobre un dispositivo compuesto de dos capas, produciendo una diferencia del voltaje o del potencial entre dichas capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo produciendo trabajo útil.



Imagen 2. Célula solar

Las células solares de los paneles son dispositivos de área moderada (~ 250 cm²), que pueden estar fabricadas de diferentes materiales. Los elementos y compuestos que se utilizan en mayores proporciones tienen la cualidad de ser semiconductores, pues conviene que conduzcan energía eléctrica sólo bajo ciertas condiciones. Principalmente se hace uso de silicio (células amorfas, monocristalinas o policristalinas), del mismo modo que se emplean

otros materiales como el seleniuro de cobre e indio, telurio de cadmio, arseniuro de galio y boro.

3.1.1. Estructura células solares

Una célula fotovoltaica está formada por varios elementos y secciones. En la Imagen 3 podemos ver cada capa de la estructura de una célula solar.

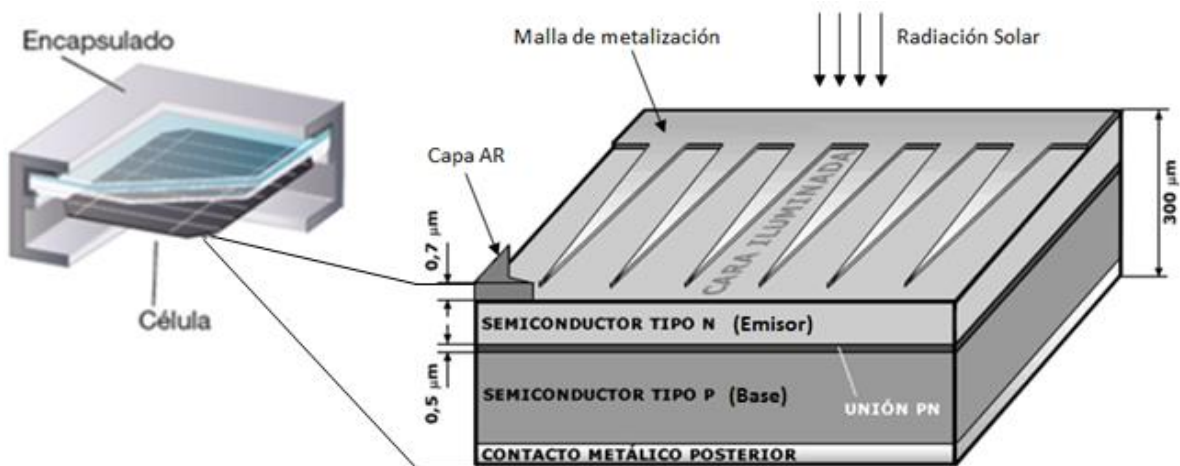


Imagen 3. Estructura simplificada de una célula fotovoltaica de unión p-n y esquema de montaje en panel solar. Las dimensiones relativas de cada elemento se han exagerado para mejor visualización.

Las capas que podemos encontrar en las células solares desde la que recibe la radiación solar hasta la cara posterior son:

- **Una capa antirreflejante** (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. El espesor y el índice de refracción de esta capa (puede ser una capa compuesta de otras varias) se diseñan de forma que la reflectancia sea mínima a cierta longitud de onda y en un intervalo lo más amplio posible del espectro. Además de estas capas, muchas células presentan superficies dotadas de surcos, micro-pirámides y otras texturas creadas para reducir aún más las pérdidas por reflexión.
- **Una malla de metalización**, representada en forma de peine en la Imagen 3, pero que puede adoptar diversas formas. El diseño de esta malla de metalización es crítico, pues debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo. El metal es un material opaco a la luz, en consecuencia, el contacto frontal no puede recubrir completamente la superficie de la célula. Su tamaño no debe ser muy pequeño, ya que

introduciría una resistencia eléctrica elevada, con una pérdida de eficiencia de la célula. Por tanto, debe de presentar una superficie lo suficientemente baja para permitir el paso de la luz del Sol y lo suficientemente alta para que la resistencia de la célula sea tolerable. Su parámetro más característico es el factor de sombra, que mide la cantidad de superficie ocupada por los dedos metálicos respecto al área total del dispositivo.

- **Las capas activas de material semiconductor**, en el que distinguimos entre las dos regiones que forman la unión p-n (denominadas emisor, n , y base, p). Habitualmente, estas capas activas aparecen depositadas o crecidas sobre un sustrato más grueso que confiere mayor resistencia mecánica al conjunto. Además del tipo y la calidad del semiconductor empleado, el espesor de las capas (emisor y base) y la densidad o concentración de impurezas influyen notablemente en el rendimiento final del dispositivo.
- **El contacto metálico posterior**, que suele realizarse metalizando toda la superficie del dispositivo cuando no existe el requisito de que ésta reciba luz por su parte posterior. [5]

A partir de esta estructura básica, se han introducido numerosas modificaciones e innovaciones con el fin de conseguir mayores eficiencias de conversión. Éste es el caso de algunas células de concentración o algunas realizadas con tecnologías de lámina delgada, una unión entre distintos materiales semiconductores o dispositivos más sofisticados que pueden presentar más de una unión en su estructura. Aparecen además, capas adicionales para mejorar el crecimiento de las secciones activas sobre un sustrato.

3.1.2. Funcionamiento de las células solares

Para entender la operación de una célula fotovoltaica, necesitamos considerar la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del sol.

Una célula solar se comporta como un diodo: la parte expuesta a la radiación solar es la zona n , y la parte situada en la franja de oscuridad, es la zona p , la cara correspondiente a esta zona se encuentra metalizada por completo (no tiene que recibir luz), mientras que en la zona n el metalizado tiene forma de peineta, a fin de que la radiación solar llegue al semiconductor.

Generalmente las células funcionan bajo el efecto fotovoltaico, mediante el cual la energía del sol se transforma parcialmente en energía eléctrica. La energía eléctrica producida puede conducir una corriente capaz de alimentar diferentes artefactos y estructuras. Cuando se requiera generar grandes cantidades de energía eléctrica pueden llegar a ser necesarios varios paneles.

A continuación se explica el proceso de funcionamiento de las células solares:

Cuando una célula solar está expuesta a la luz, al estar formada por un material semiconductor con una carga positiva (p) y una carga negativa (n), permite que un fotón de la luz solar “arranque” un electrón. Ese electrón libre deja un “hueco” el cual será llenado por otro electrón que a su vez fue arrancado de su propio átomo.

El trabajo de la célula es provocar que los electrones libres vayan de un material semiconductor a otro en busca de un “hueco” que llenar. Esto produce una diferencia de potencial y por tanto una corriente eléctrica, es decir, que se producirá un flujo de electricidad del punto de mayor potencial al de menor potencial hasta que en los dos puntos el potencial sea el mismo.
[1]

En la Imagen 4 se observa el efecto de conducción energética en los paneles solares.

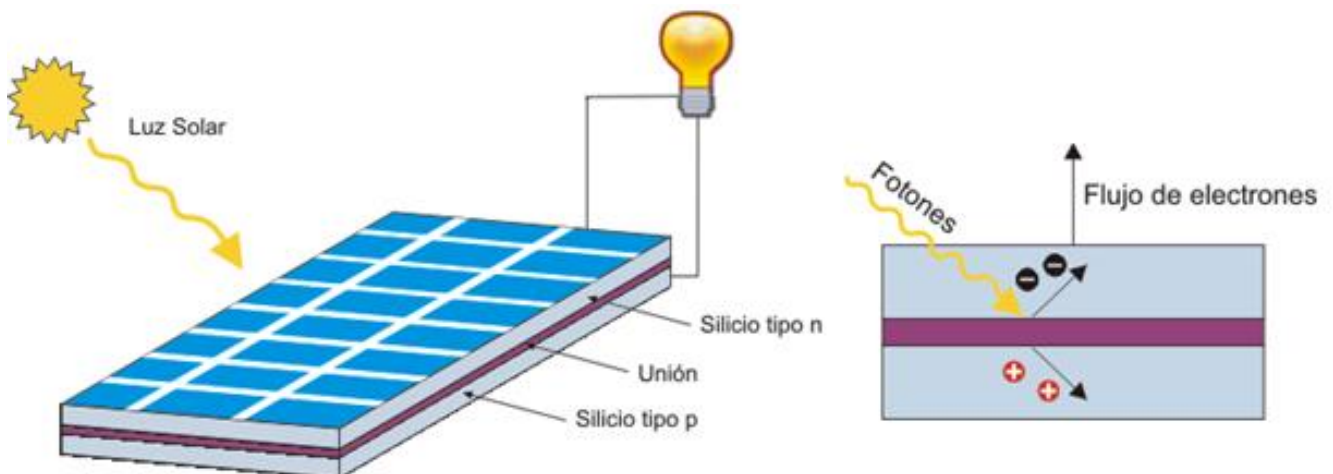


Imagen 4. Efecto fotovoltaico en una célula solar

3.1.3. Parámetros característicos

Cuando se ilumina una célula solar mientras está conectada a una carga externa, ésta funciona como un generador de energía y exhibe unos valores de corriente y tensión que son variables en función de las condiciones de operación (temperatura, irradiancia) y del punto de trabajo que impone la carga.

El punto de funcionamiento de una célula solar para una irradiancia determinada a una temperatura de célula fija, viene descrita en lo que se conoce como la curva I-V (corriente - voltaje). En la Imagen 5 se representa la gráfica que describe la corriente que produce una célula solar para distintos valores de voltaje a condiciones estándar de medida (CEM) (temperatura de la célula 25°C, irradiancia de 1000 W/m² y con una masa de aire espectral de 1,5 (AM 1,5)).

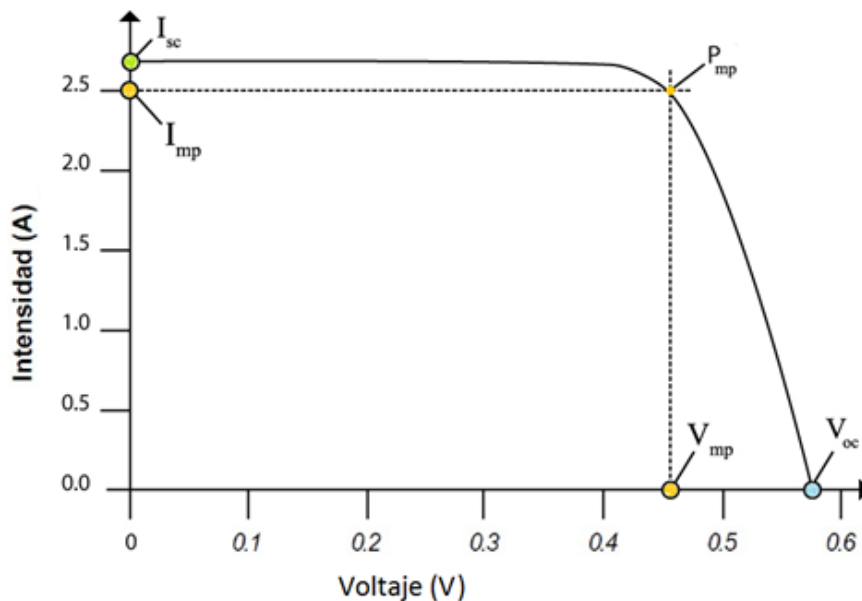


Imagen 5. Curva característica I-V

Los parámetros más importantes de una curva I-V son:

- El **punto de potencia máxima** V_{mp} e I_{mp} . Este punto nos indica el nivel óptimo de operación del panel fotovoltaico. La multiplicación de la corriente I_{mp} por el voltaje V_{mp} nos da la potencia máxima de operación (P_{mp}) del panel

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

que es el punto de operación ideal de una célula. Si el panel opera a un voltaje menor o mayor al V_{mp} la potencia de salida del panel baja. El área debajo de la curva es proporcional a la potencia que genera la célula solar fotovoltaica.

- El **voltaje de circuito abierto** V_{oc} . Este es el voltaje máximo de salida del panel fotovoltaico y ocurre cuando la corriente del panel es cero. Este es un parámetro muy fácil de medir y sirve de referencia para hacerle pruebas a un panel y verificar si cumple con las especificaciones de referencia. Este valor también es de suma importancia cuando se están diseñando "strings" (paneles fotovoltaicos conectados en serie) que van a ser conectados a un inversor central.
- La **corriente de corto circuito** I_{oc} . Esta es la corriente máxima de salida del panel fotovoltaico y ocurre cuando el voltaje del panel es cero. Este parámetro también nos sirve para hacer pruebas al panel y verificar sus especificaciones de referencia. Este valor también es de suma importancia cuando se está diseñando la protección del sistema fotovoltaico.[8]

Con el fin de que las células solares puedan entregar su potencia máxima, la carga alimentada debe ser ajustada de modo que el punto de operación se localice siempre en el punto de potencia máxima de operación. Si se varían las condiciones de la carga entonces ese punto cambia su valor de voltaje y corriente y se desplaza describiendo precisamente la forma de la curva característica corriente-voltaje.

3.1.4. Factor de forma

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. Este parámetro se puede ver representado en la siguiente imagen:

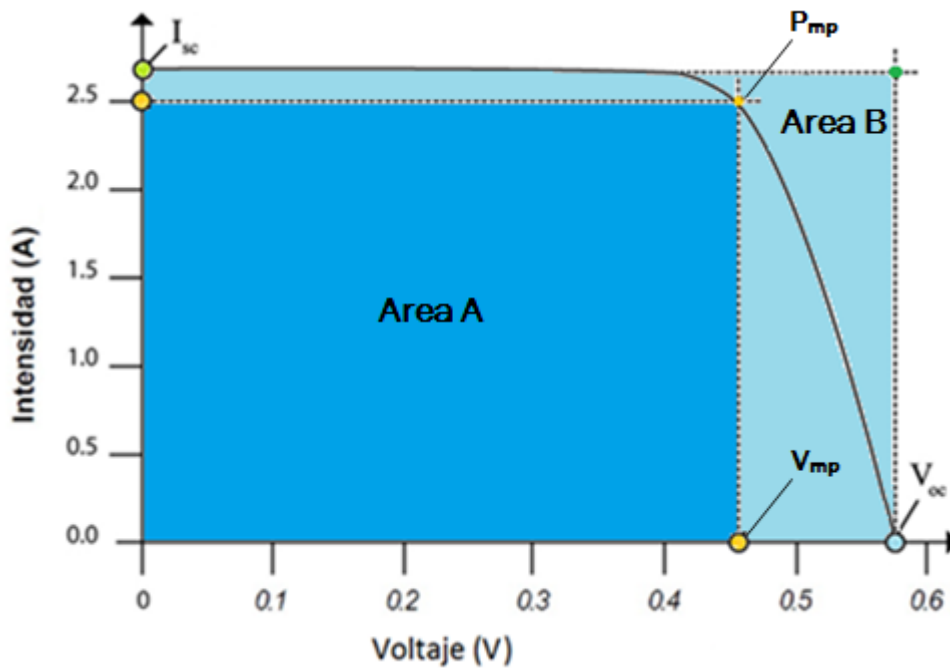


Imagen 6. Curva característica I-V con representación de las áreas de las potencias que presenta una célula solar

Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito, es decir:

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{Area A}{Area B}$$

Para las células solares, los valores del FF se suelen encontrar entre los siguientes intervalos:

- FF en las Células Cristalinas oscila de 0.70 a 0.85
- FF en las Células Amorphas varían de 0.50 a 0.70

El máximo FF teórico aumenta con el valor de V_{oc} . No resulta fácil aumentar el valor de V_{oc} utilizando el mismo material, por lo que se recurre al empleo de otros materiales para aumentarlo.

Este es un parámetro clave para evaluar el rendimiento de las células solares comerciales.

3.1.5. Eficiencia de las células solares

La eficiencia de las células solares viene marcada por el material por el que se encuentren compuestas. La eficiencia de una célula solar, η , es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una célula solar está conectada a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, P_{mp} , dividido entre la luz que llega a la célula (E , en W/m^2), bajo condiciones estándar (CEM) y el área superficial de la célula solar (A_c , en m^2).

$$\eta = \frac{P_{mp}}{E \cdot A_c}$$

Para el caso de las células solares de silicio monocristalino, actualmente no pueden convertir más del 25% de la energía solar en electricidad.

Las células solares de silicio policristalino por su parte, tienen una eficiencia de menos del 20% y las células amorfas de silicio tienen actualmente una eficiencia cerca del 10%, debido a pérdidas de energía internas más altas que las del silicio monocristalino.

El que las células solares no puedan producir más energía que la que reciben cada segundo en forma de luz se debe a que la luz solar contiene una amplia mezcla de fotones de diferentes longitudes de onda y energías y cualquier célula solar de una sola unión será optimizada para atrapar los fotones sólo dentro de una cierta banda de frecuencia.

Una típica célula fotovoltaica de silicio monocristalino de 250 cm^2 producirá cerca de 4 Vatios de energía a 0.5 Voltios y 7 Amperios de Corriente Continua bajo la luz del sol en pleno verano con una temperatura de unos 25°C , con unos 1000 W/m^2 de irradiancia.

A diferencia de la cantidad de energía que puede producir una célula fotovoltaica, el voltaje de la célula no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz. Para comparar diversas células se las clasifica por densidad de corriente, o amperios por centímetro cuadrado del área de la célula.

En cuanto a la potencia entregada por una célula solar, esta se puede aumentar empleando un mecanismo de seguimiento para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al sol, o concentrando la luz del

sol usando lentes o espejos. Sin embargo, hay límites a este proceso, debido a la complejidad de los mecanismos, y de la necesidad de refrescar las células. La corriente es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la célula.

3.1.6. Factores que influyen en la producción de energía de una célula solar

La cantidad de energía que puede llegar a generar la célula solar depende directamente de una serie de factores entre los que se encuentran:

El tipo y el área del material.

En función del material del que estén compuestas las células solares, estas presentarán mayor o menos eficiencia a la hora de producir energía, como se ha comentado en el punto anterior. A su vez, cuanto mayor sea el área de la célula solar, mayor será la superficie que capte la radiación solar para después convertirla en energía.

Cantidad de luz solar que incide sobre la célula (irradiación).

El voltaje del panel solar no va a variar mucho con la intensidad de la luz solar, pero la corriente sí. Esto significa que si hay poca luz solar, va a haber poca corriente y a su vez poca potencia de salida. En la siguiente gráfica se observan las variaciones de la curva característica I-V en función de la irradiación:

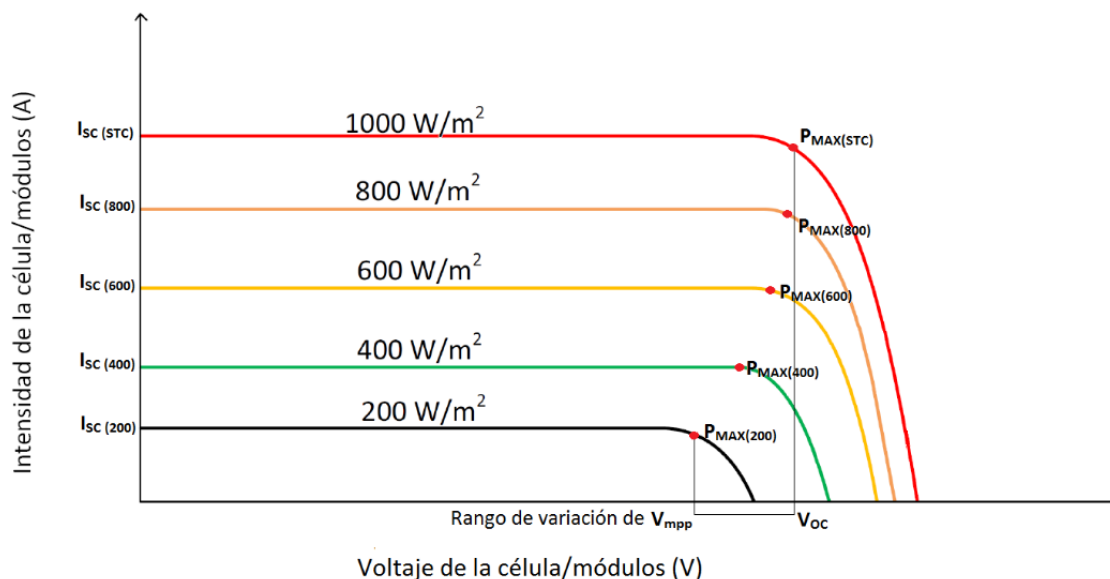


Imagen 7. Variación de la curva I-V en función de la irradiación

La tensión y corriente genera en una célula depende directamente de la iluminación recibida. La corriente de cortocircuito de la célula es directamente proporcional a la irradiancia como se muestra en la imagen anterior, disminuyendo a medida que se reduce la irradiancia. La tensión de circuito abierto varía poco con la irradiancia, aunque también decrece, por lo que a efectos prácticos se puede considerar constante. [3]

La temperatura.

La temperatura a la que opera la célula solar afecta el voltaje de operación del panel solar. Algunos de los efectos que se produce cuando se aumenta la temperatura son:

- Aumenta ligeramente la intensidad de cortocircuito
- Disminuye el voltaje de circuito abierto
- El factor de forma disminuye
- El rendimiento decrece

En la siguiente imagen se ven los efectos de variar la temperatura a la que opera la célula solar:

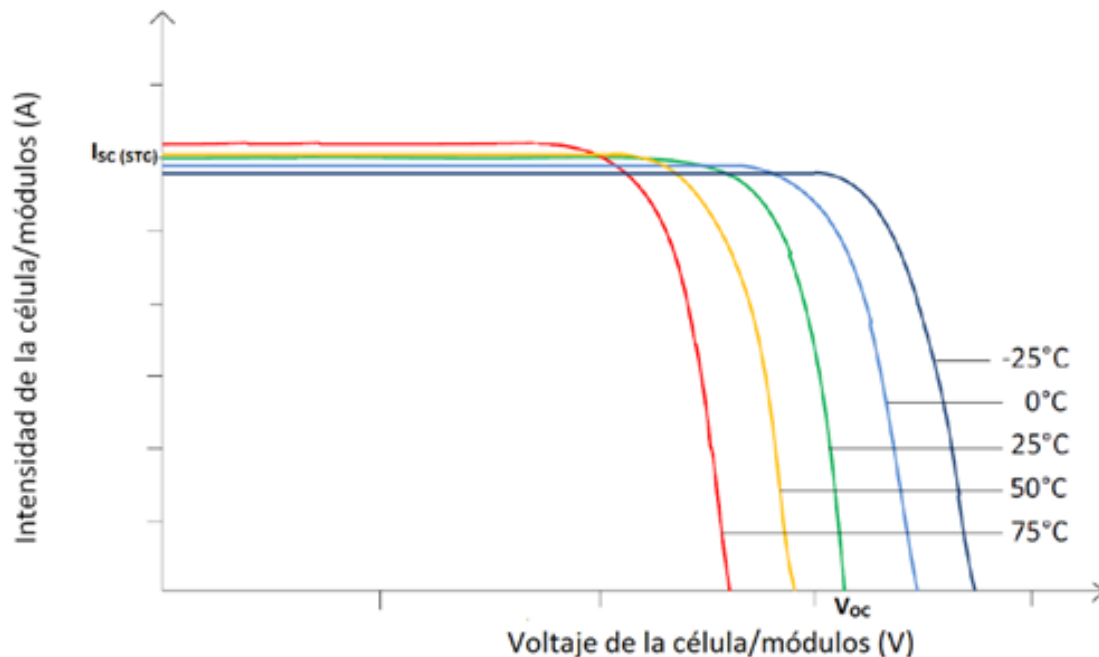


Imagen 8. Variación de la curva I-V en función de la temperatura

Como se aprecia, el voltaje de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura. La intensidad de cortocircuito, sin embargo, aumenta cuando aumenta la temperatura, aunque la variación es muy pequeña y a efectos prácticos se considera constante. [3]

Inclinación y orientación de los paneles.

Los paneles solares deben presentar un ángulo de inclinación óptimo para captar los rayos del sol de manera perpendicular. Una inclinación equivocada podría causar una pérdida significativa de la eficiencia de todo el sistema solar. En cuanto a la orientación, depende de la latitud, por lo que la orientación óptima de los paneles podrá ser sur o norte.

Presencia de sombras.

Las sombras afectan adversamente la producción de energía de un panel. La presencia de sombras hace que la parte del panel que se encuentra sombreado produzca energía con una eficiencia menor. Pueden causar que la producción de energía de un panel se reduzca un 75%.

Todos estos factores deberán ser tenidos en cuenta a la hora de trabajar con células solares.

A continuación se pasará a desarrollar los materiales de los que pueden estar compuestas las células solares.

3.2. MC- SI / C- SI

Como se comentó anteriormente, las células solares se suelen clasificar generalmente por el tipo de material semiconductor que se encarga en recibir la radiación solar, pudiéndose establecer los siguientes tres grupos:

- a) Células basadas en el silicio monocristalino (c-Si) y multicristalino (mc-Si)
- b) Células de lámina delgada o en capa fina de sus componentes activos, películas de silicio (TF-Si), silicio amorfo (a-Si), calcopiritas (CIGS), y telurio de cadmio (CdTe)
- c) Células III-V o de alta eficiencia

Actualmente la tecnología dominante es el silicio cristalino, aunque los dispositivos de lámina delgada están destacando gracias a un mejor aprovechamiento de la radiación difusa y ser más inmunes respecto a las altas temperaturas.

Entre los sistemas fotovoltaicos instalados, más del 90% son células de silicio cristalino, tanto mono (c-Si) como multi-cristalinos (mc-Si). El primer tipo se encuentra más generalizado a nivel mundial y aunque su proceso de

elaboración es más complicado, suele presentar mejores resultados en cuanto a su eficiencia.

Por otro lado, las obleas de silicio multicristalinas cuentan con un menor coste de fabricación, son dispositivos de gran área y que inevitablemente presentan una serie de inhomogeneidades y defectos estructurales. Por ejemplo, el exceso de vida útil del portador se ve afectado por los límites de grano e impurezas, dislocaciones, metalización y efectos de borde los cuales conllevan a una reducción de la eficiencia del panel solar.

El proceso de obtención, tanto del mono-Si como del multi-Si, es el paso más costoso de los que integran la fabricación de una célula solar, tanto en términos económicos como energéticos. Aproximadamente el 60% del coste económico y el 75% del coste energético de una instalación fotovoltaica, se invierte en la obtención del silicio.

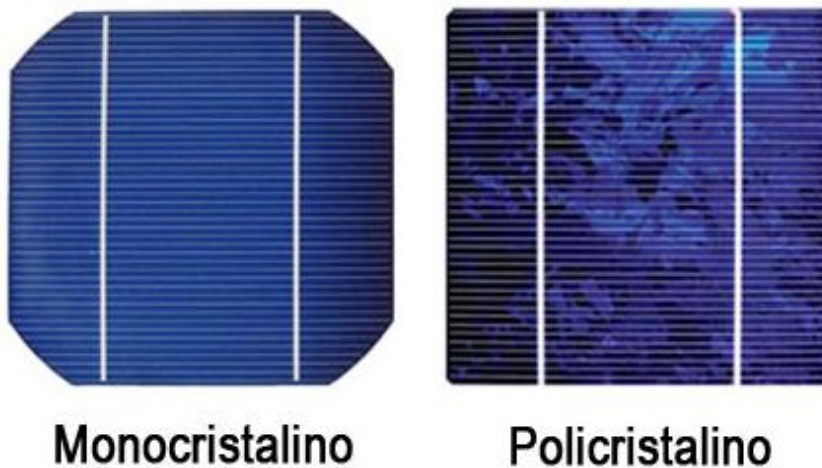


Imagen 9. Células fotovoltaicas de silicio mono y poli-cristalino

La diferencia entre las células monocristalinas y las policristalinas es la pureza del silicio que presentan. Cuanto más puro es el silicio, mejor alineadas están sus moléculas, y mejor convierte la energía solar en electricidad.

Las monocristalinas presentan mayor pureza de silicio, por tanto, la eficiencia de estos paneles solares es mayor.

Paneles monocristalinos de células de silicio

Las células solares de silicio monocristalino (mono-Si), son bastante fáciles de reconocer por su coloración y aspecto uniforme, que indica una alta pureza en silicio, tal como se muestra en la Imagen 10:



Imagen 10. Panel solar fotovoltaico monocristalino

Las células monocristalinas se fabrican con bloques de silicio o ingots, que son de forma cilíndrica. Para optimizar el rendimiento y reducir los costes de cada célula solar monocristalina, se recortan los cuatro lados de los bloques cilíndricos para hacer láminas de silicio, y que les da esa apariencia característica.

Una de las formas más sencillas para saber si tenemos delante un panel solar monocristalino o policristalino, es que en el policristalino las células son perfectamente rectangulares y no tienen esquinas redondeadas.

Ventajas de los paneles solares monocristalinos:

- Los paneles solares monocristalinos tienen las mayores tasas de eficiencia puesto que se fabrican con silicio de alta pureza. La eficiencia en estos paneles tiene un máximo del 25% de conversión.
- La vida útil de los paneles monocristalinos es más larga. De hecho, muchos fabricantes ofrecen garantías de hasta 25 años.
- Suelen funcionar mejor que los paneles policristalinos de similares características en condiciones de poca luz.

- Aunque el rendimiento en todos los paneles se reduce con temperaturas altas, esto ocurre en menor medida en los monocristalinos que en los policristalinos.

Desventajas de los paneles monocristalinos:

- Son más caros.
- Si el panel se cubre parcialmente por una sombra, suciedad o nieve, el circuito entero puede averiarse. Para evitar este problema, se emplean micro inversores en vez de inversores en cadena o centrales. Los micro inversores aseguran que no toda la instalación solar se vea afectada por sólo un panel afectado.
- Para su fabricación se emplea el proceso Czochralski, en el que se obtienen lingotes monocristalinos con forma cilíndrica. Posteriormente, se recortan cuatro lados para hacer las láminas de silicio, por lo que se derrocha una gran cantidad de silicio en el proceso.

Paneles policristalinos de silicio

A diferencia de los paneles monocristalinos, en su fabricación no se emplea el método Czochralski. El silicio en bruto se funde y se vierte en un molde cuadrado. A continuación se enfría y se corta en láminas perfectamente cuadradas.



Imagen 11. Panel solar fotovoltaico policristalino

Ventajas de los paneles policristalinos:

- El proceso de fabricación de los paneles fotovoltaicos policristalinos es más simple, lo que redundará en menor precio. Se pierde mucho menos silicio en el proceso que en el monocristalino.

Inconvenientes de los paneles policristalinos:

- Los paneles policristalinos suelen tener menor resistencia al calor que los monocristalinos. Esto significa que en altas temperaturas un panel policristalino funcionará peor que un monocristalino. El calor además puede afectar a su vida útil, acortándola.
- La eficiencia de un panel policristalino se sitúa típicamente entre el 13-16%, debido a que no tienen un silicio tan puro como los monocristalinos.
- Mayor necesidad de espacio. Se necesita cubrir una superficie mayor con paneles policristalinos que con monocristalinos.[2]

3.3. Plantas de producción

En este apartado se detalla la composición de las plantas fotovoltaicas y paneles solares, atendiendo a su vez a los tipos de conexiones eléctricas que se pueden encontrar en las plantas fotovoltaicas y los tipos de plantas que hay.

3.3.1. Paneles y strings

En una instalación fotovoltaica, la célula fotovoltaica es el elemento base. Como se comentó anteriormente una célula solar típica posee en la actualidad una superficie de 250 centímetros cuadrados y produce aproximadamente una potencia cercana a los 4 Vatios y una intensidad de entre 7 y 8 Amperios. El escaso valor de la tensión y la potencia hace necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de proporcionar la potencia necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación. Es de este hecho de donde surge el concepto de panel solar o módulo fotovoltaico, los cuales están formados por unas 30 ó 50 células colocadas en filas y columnas conformando una matriz, unidas de forma que puedan suministrar la mayor cantidad de energía eléctrica, como se detalla en apartados sucesivos.

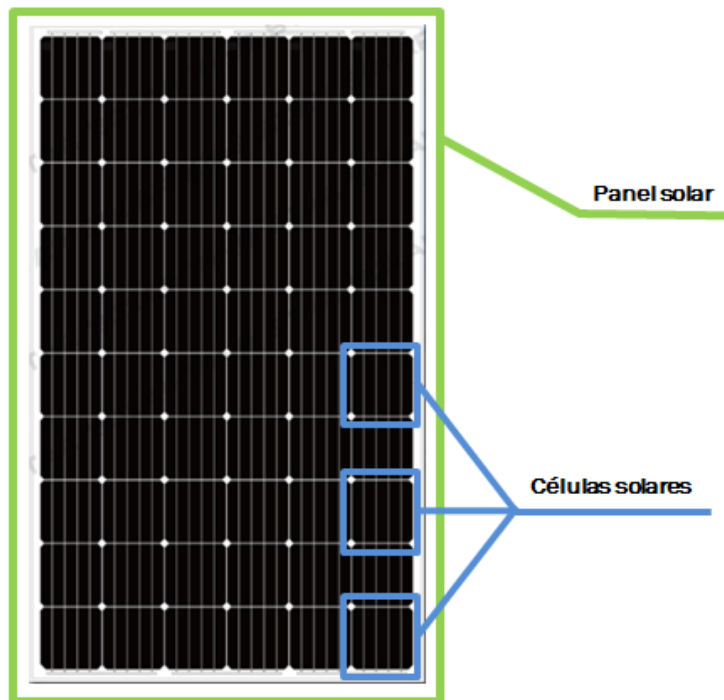


Imagen 12. Estructura de un panel solar formado por células fotovoltaicas

Un panel, en condiciones óptimas de iluminación y dependiendo del tamaño, suministra entre 100 W y 250 W.

La conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica está sujeta a la cantidad de potencia que se desea inyectar, lo cual se refleja en la cantidad de paneles con los que se cuenta. Varios paneles fotovoltaicos conectados en serie son conocidos como una cadena o string.



Imagen 13. Cadena de paneles solares conectados en serie o string

Debido tanto al tamaño como a la eficiencia, si se quieren emplear células solares para el suministro de energía eléctrica a un hogar, es preciso utilizar del orden de 6-8 m² de paneles solares por persona (aunque esto varía según la localización geográfica). Por otro lado, si lo que se pretende es obtener energía eléctrica en cantidades equiparables a las que producen las centrales térmicas convencionales, es preciso utilizar cientos de miles de paneles solares y por lo tanto, millones de células solares. Esta gran agrupación de paneles solares se conoce como planta fotovoltaica, las cuales se instalan en grandes extensiones de terreno, siendo este uno de los principales inconvenientes que tiene la utilización a gran escala de la instalación solar fotovoltaica.

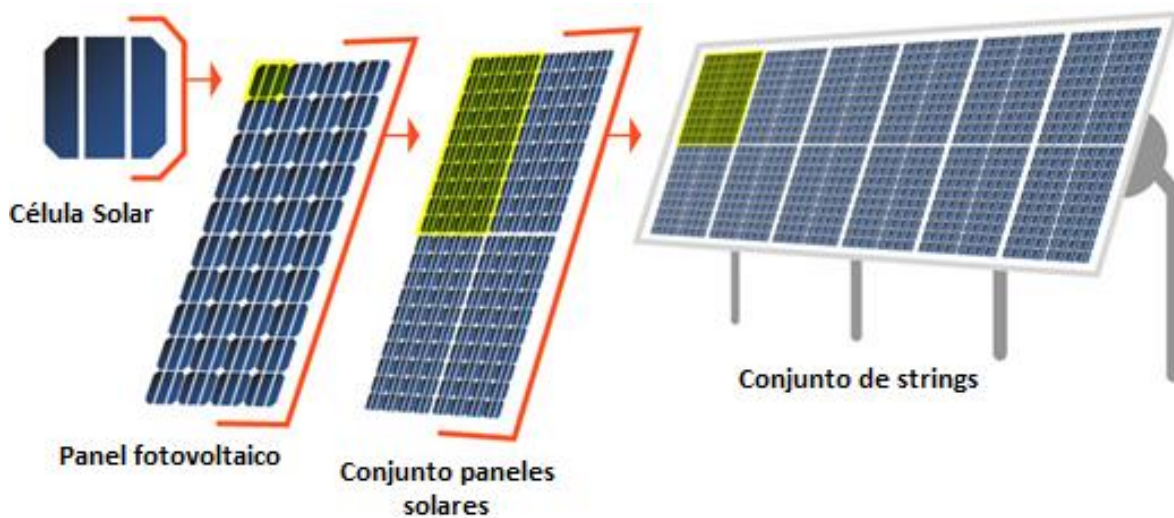


Imagen 14. Diferentes agrupaciones de células y paneles fotovoltaicos

Las siguientes imágenes muestran una instalación de autoconsumo eléctrico familiar (izquierda) y la planta fotovoltaica más grande del mundo, *Topaz Solar Farm*, situado en California. Esta planta solar produce 550 MW de potencia, para lo que necesita 9 millones de paneles fotovoltaicos, que ocupa una extensión de 25 km². Por ello, se hace necesario diseñar un prototipo que permita una rápida medida de los paneles, ya que hay veces que debido a la gran cantidad de paneles que presentan las plantas fotovoltaicas, se hace imposible analizar todos los paneles porque implicaría una gran inversión de tiempo, por lo que solo un pequeño porcentaje de ellos es medido. [4]

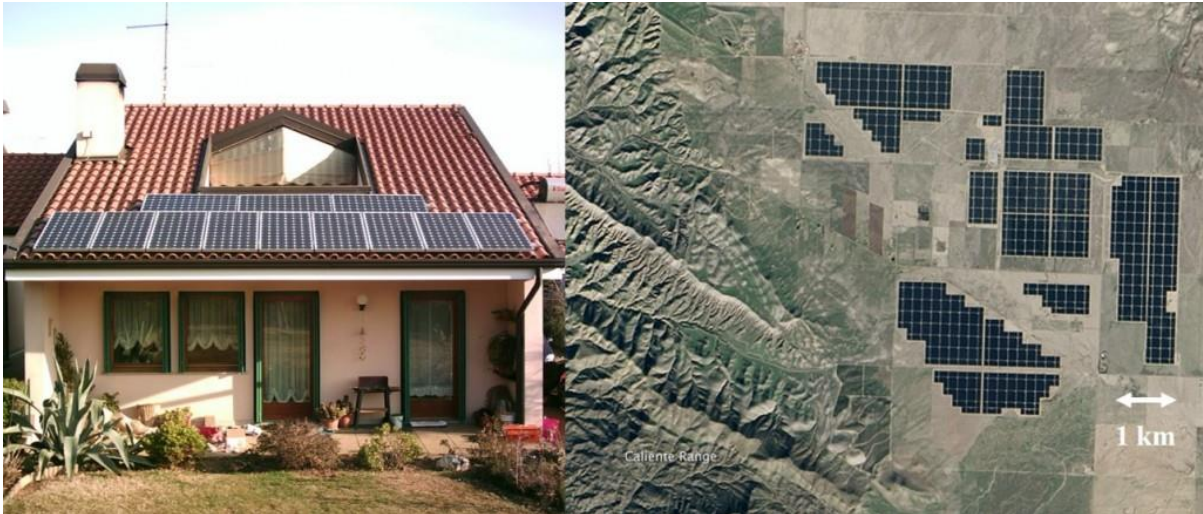


Imagen 15. Izquierda: instalación de autoconsumo eléctrico de tamaño moderado, con 12 paneles fotovoltaicos. Derecha: planta solar Topaz.

De manera general, las plantas fotovoltaicas presentan los siguientes elementos mostrados en la Imagen 16.

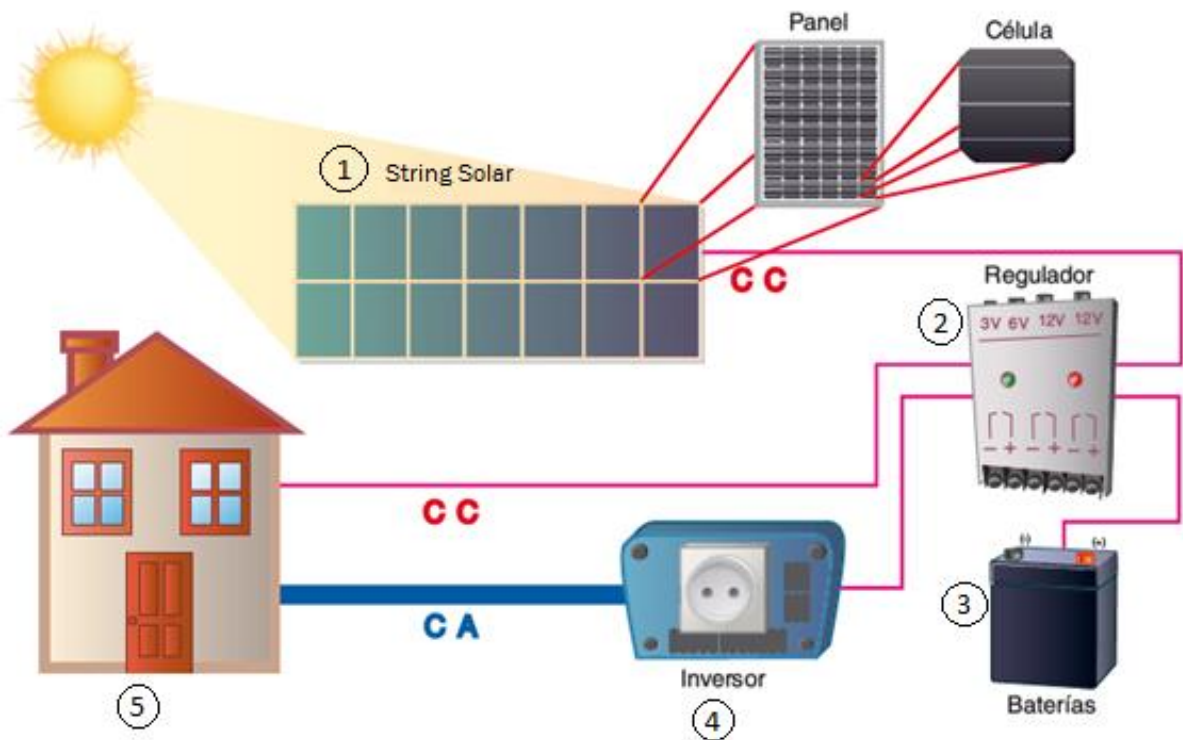


Imagen 16. Componentes de la instalación

1. Panel fotovoltaico

Es el elemento primordial de la instalación, que transforma la energía lumínica del sol en energía eléctrica mediante las células solares

2. Regulador de la carga

Es el nexo de unión entre los paneles solares y los elementos de consumo de la instalación. Se encarga también de proteger a los acumuladores ante sobrecargas.

3. La batería

Solo está presente en instalaciones autónomas. Proporciona energía a la instalación durante los periodos sin luz solar o sin suficiente luminosidad. Acumula energía para la instalación.

4. El inversor

Es un elemento imprescindible en las instalaciones conectadas a red, y estará presente en la mayoría de instalaciones autónomas. Es el que hace posible el aprovechamiento de la electricidad generada en las placas solares para utilizarla en los diferentes consumos. Su función básica es transformar la corriente continua de la instalación en corriente alterna, igual a la utilizada en la red eléctrica, a la vez que almacena y descarga la energía en las baterías. El inversor a su vez funciona solo a partir de un umbral mínimo de radiación solar. Permite también la desconexión-conexión automática de la instalación fotovoltaica, en caso de que haya pérdidas de tensión o frecuencia en la red. Hay determinados aspectos que deberán cumplir los inversores, entre los que destacan:

- Deberán tener un eficiencia alta, pues en caso contrario se habrá de aumentar innecesariamente el número de paneles para alimentar la carga
- Deben estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas
- Incorporar rearme y desconexión automáticos

5. Aparatos a conectar o cargas del sistema

Las cargas pueden ser en corriente continua DC o en corriente alterna AC. El consumo de las cargas es una parte determinante del equipo ya que es el que nos indicarán el dimensionado del sistema.

3.3.2. Conexión eléctrico

A la hora de determinar el número de células que son necesarias en cada panel solar, es necesario obtener los valores adecuados de tensión y de corriente necesarios para cada tipo de instalación.

Dependiendo de la instalación que estemos desarrollando, y de la aplicación para la que se ha diseñado, existe la posibilidad de utilizar un solo panel o un conjunto de paneles, que se montarán agrupados sobre un determinado soporte y conectados entre sí eléctricamente.

Cuando necesitamos unos valores determinados de tensión y corriente que no se pueden obtener con un único panel fotovoltaico, se recurre a la conexión en grupo de varios paneles solares en serie o en paralelo. Los elementos conectados en serie presentan todos la misma corriente, mientras que los elementos asociados en paralelo tienen todos la misma tensión.

La conexión de los paneles fotovoltaicos se realiza por la parte posterior de los mismos, en una caja de conexiones preparada para tal fin (Imagen 17).



Imagen 17. Caja de conexiones de un panel fotovoltaico.

Según la conexión eléctrica que hagamos de las células, nos podemos encontrar con las siguientes posibilidades:

- **Conexión de paneles solares en paralelo:** con este tipo de conexión se consigue aumentar la corriente generada en la rama, manteniendo a su vez la misma tensión que la de uno de los paneles que componen dicha rama.

La tensión total (de salida) en las conexiones en paralelo es igual a la de salida cada rama y la corriente total (de salida) es la suma de corrientes de cada rama.

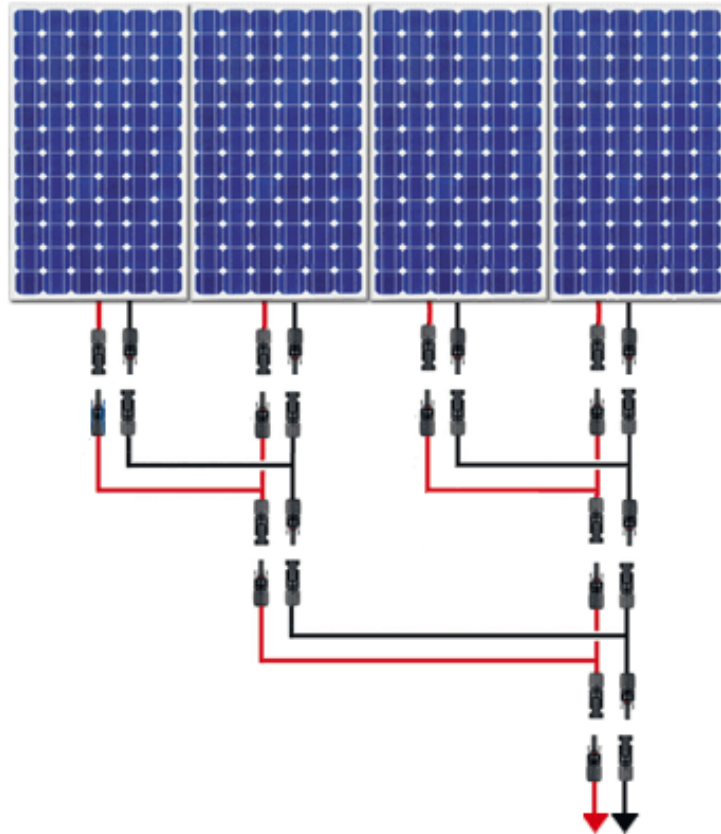


Imagen 18. Conexión paneles solares en paralelo

- **Conexión de paneles fotovoltaicos en serie:** esta conexión permite aumentar la tensión final y mantener el mismo valor de corriente para todos los paneles.

En conexiones en serie, la corriente total generada (de salida) es igual a la de uno de los paneles que componen la rama (string) y la tensión total (de salida) es la suma de la tensión de cada panel conectado en serie o la multiplicación de la tensión unitaria por el número de paneles de la rama, pues siempre se deben conectar paneles de las mismas características unos con otros.

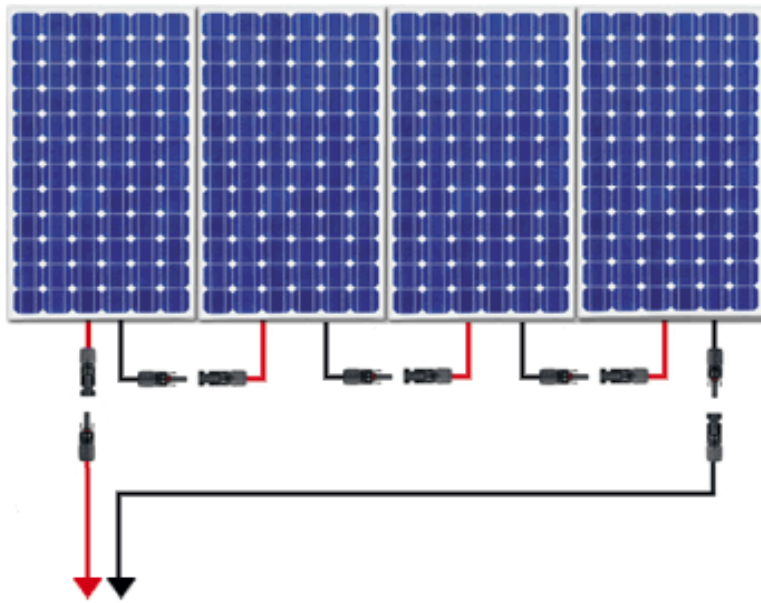


Imagen 19. Conexión paneles solares en serie

- **Conexión mixta de placas solares:** en este caso sería una configuración donde encontramos ramas con paneles conectados en serie y a su vez, estas ramas, conectadas en paralelo. Esta configuración se usa cuando debemos lograr unas corrientes y tensiones de salida muy determinadas.

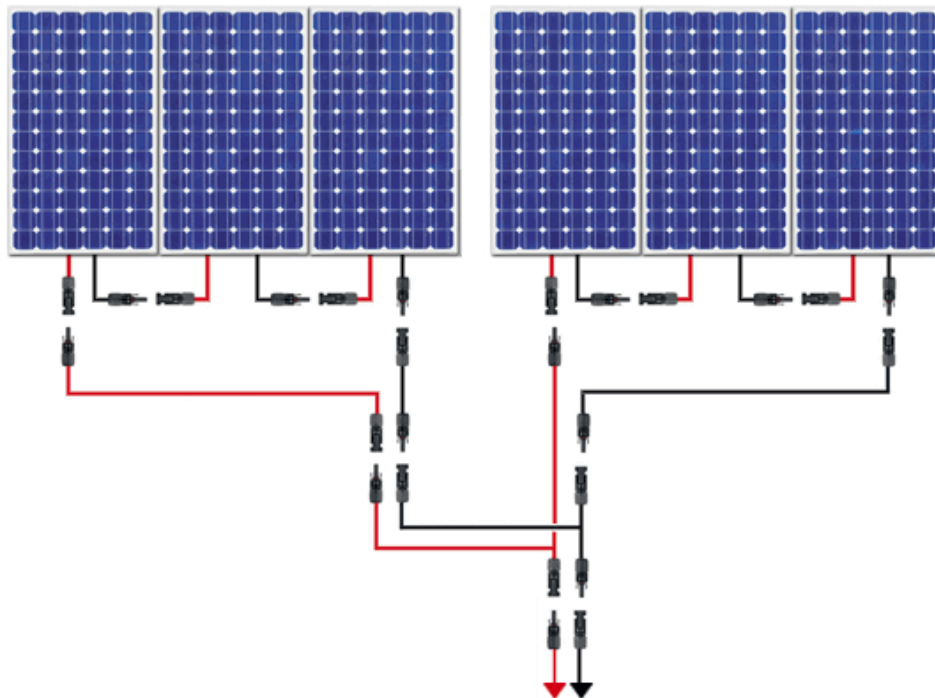


Imagen 20. Conexión mixta de paneles solares

En la siguiente imagen se puede ver el resultado que produce en la curva característica I-V la unión de paneles solares en serie o en paralelo. [10]

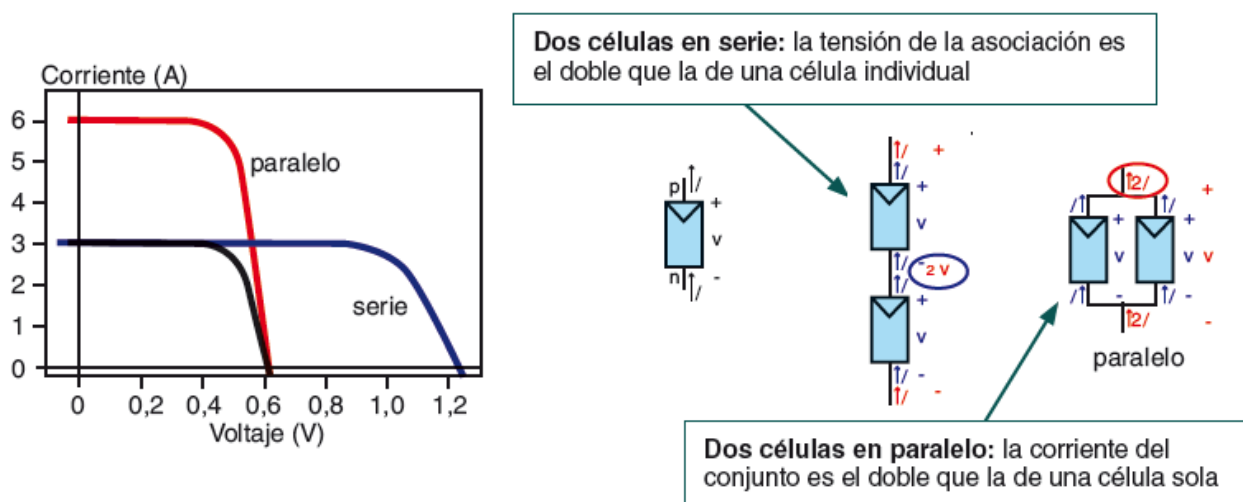


Imagen 21. Asociación de células solares. Si necesitamos aumentar la tensión, las uniremos en serie; si lo que queremos es aumentar la corriente, haremos la asociación en paralelo.

3.3.3. Dos tipos de plantas

Como ya se ha comentado anteriormente, el panel fotovoltaico es el elemento principal de una instalación fotovoltaica, pero además de este se requiere de una serie de elementos complementarios que son necesarios para garantizar la funcionalidad, control y durabilidad de la instalación solar.

Teniendo en cuenta estos elementos complementarios se diferencian dos tipos de instalaciones fotovoltaicas básicas:

- Las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red (On-Grid)
- Las instalaciones fotovoltaicas autónomas (Off-Grid) aisladas de la red eléctrica

On- Grid

La instalación On-Grid o conectada a la red, se encuentra conectada directamente a la red eléctrica local. Esto implica que durante las horas de luz del día, el usuario consume la energía solar producida por su propia instalación, mientras que cuando no hay luz o ésta no es suficiente, el sistema no produce electricidad debido a que no hay un componente que almacene la energía (una batería).

Generalmente este tipo de instalación fotovoltaica es usada en casas pequeñas o en locales comerciales que solo necesitan electricidad durante el transcurso del día, sin embargo para este tipo de instalación es indispensable tener acceso a la red eléctrica, por lo que no funciona en zonas aisladas.

Componentes de un Sistema On - Grid

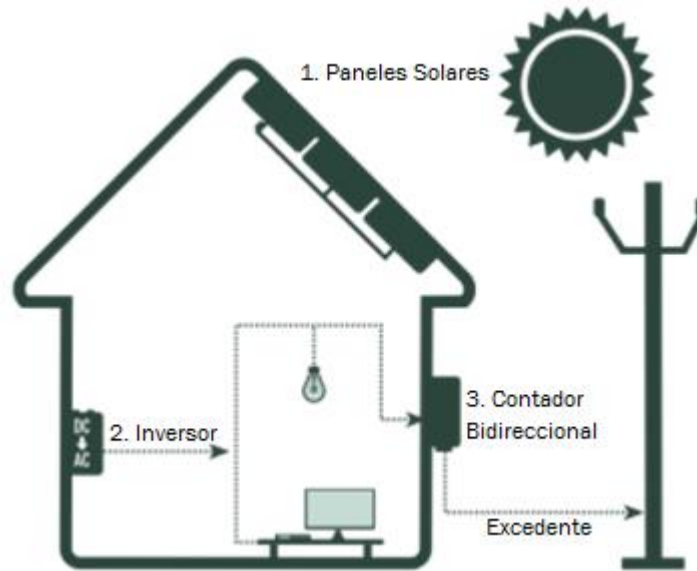


Imagen 22. Instalación On-Grid

Para su instalación se emplean:

1. paneles fotovoltaicos
2. Inversores
3. Contadores bidireccionales, por donde pasa el excedente de energía.

Para este sistema las baterías no se hacen necesarias puesto que el sistema se conecta a la red y no acumula energía, lo que hace que este sistema sea de menor costo.

Off-Grid

A diferencia de la instalación On-Grid, una instalación fotovoltaica Off - Grid o aislada, es un sistema solar fotovoltaico que no está conectado a la red eléctrica, destinadas al suministro eléctrico cuando el coste de mantenimiento y de instalación de las líneas eléctricas no es rentable. Normalmente requiere el almacenamiento de la energía fotovoltaica generada en acumuladores solares y permite utilizarla durante las 24 horas del día.

A diferencia del sistema On-Grid, éste sistema no tiene tantas restricciones, lo que le permite ser empleado en gran diversidad de sitios, tanto en viviendas como explotaciones agropecuarias que no disponen de electricidad, y puedan aprovechar la energía solar fotovoltaica sin necesidad de solicitar conexión a la red eléctrica nacional, lo que las hace ideales para regiones donde la conexión a la red eléctrica no es posible.

Este sistema está totalmente automatizado, por lo que no requiere de la interacción del usuario en ningún momento.

Componentes de una instalación fotovoltaica Off – Grid

Este sistema fotovoltaico normalmente está compuesto por:

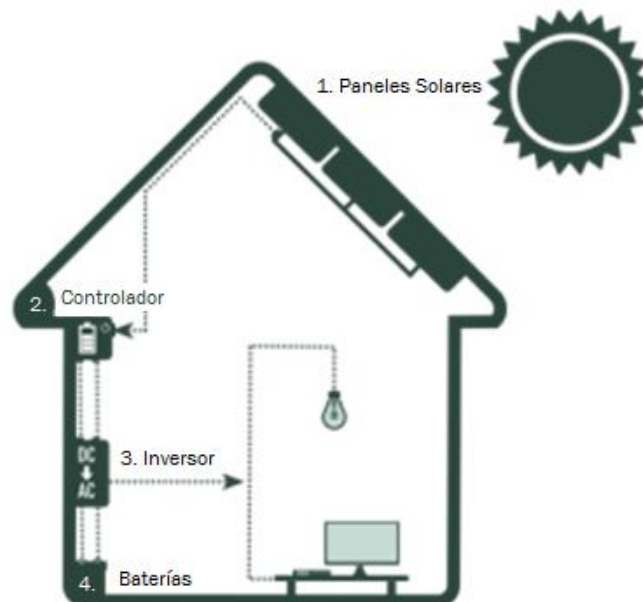


Imagen 23. Instalación Off – Grid

1. **Paneles Solares**
2. **Controlador:** Encargado de asegurar la carga de las baterías. Protege las baterías de sobrecargas (cuando los paneles solares siguen produciendo energía y las cargas no la consumen) y también bloquea el paso de corriente de las baterías en caso de descarga.
3. **Inversor:** Para este sistema se emplean inversores off grid. Estos inversores utilizan la energía solar para suplir la demanda durante el día y mantener las cargas de las baterías durante el día para el uso nocturno de las mismas.
4. **Batería:** Almacena la electricidad que se produce durante el día y la consume en horas de la noche.



CAPÍTULO 4. Caracterización por Electroluminiscencia (EL)

Debido a la cada vez más alta demanda de producción de módulos y a que el proceso de cristalización da lugar a un material con un elevado número de defectos (granos, fronteras de grano etc.), se hace necesario controlar los procesos de producción para obtener células lo más reproducibles posibles y que posean la máxima eficiencia permitida.

Por ello, en este capítulo hablaremos de las mejores técnicas de medición que existen para caracterizar células solares y detectar cualquier tipo de defecto que puedan presentar. A su vez, se detallarán los equipos con los que se hace posible caracterizar las células solares y para qué situaciones es mejor emplear unos métodos u otros.

4.1. Técnicas de medida de células solares

Dentro del sistema fotovoltaico, como ya se dijo en capítulos anteriores, el módulo es el componente más importante, debido a que es el elemento que convierte la irradiación incidente en energía eléctrica y a su vez es el principal gasto de la instalación, ya que el costo de los módulos es comúnmente el 50% del costo total de las instalaciones fotovoltaicas. Además, el módulo es el elemento que se encuentra más expuesto a condiciones adversas.

Estas tres razones hacen necesario realizar un estudio de la degradación del mismo con el paso del tiempo y un adecuado control de calidad durante el suministro o durante las tareas de mantenimiento preventivo, ya que si se produce degradación del módulo, se reduce o termina la capacidad del mismo para realizar su función de proporcionar energía eléctrica segura y útil.

El mantenimiento preventivo de una planta fotovoltaica se requiere para poder identificar rápidamente el panel solar con defectos en las células solares que están reduciendo la eficiencia global de la planta.

Inyectando al sistema una corriente de polarización inversa y escaneando rápidamente en modo vídeo, es posible inspeccionar un elevado número de paneles solares de manera rápida y fiable. Las células que están dañadas o menos eficientes aparecerán inmediatamente, permitiendo la identificación

de los paneles que deben ser reemplazados con el fin de restaurar la eficiencia global.

La degradación inducida por la luz (LID), la degradación inducida por el potencial (PID), la degradación relacionada con impurezas y defectos estructurales, se reconocen como problemas que obstaculizan una mayor mejora del rendimiento de las células solares. Por lo tanto es importante saber los orígenes y mecanismos de degradación que sufren las células.

Para la certificación de módulos fotovoltaicos existen 17 pruebas que determinan las características térmicas y eléctricas del módulo.

Para el control de calidad de un suministro de módulos fotovoltaicos, no es posible realizar todas estas pruebas en cada módulo por dos razones: varias de ellas son pruebas destructivas y la realización de todas las pruebas no destructivas es demasiado cara, además de ello sería necesario invertir mucho tiempo para el control de calidad. [9]

Por lo tanto, las pruebas más representativas de los controles de calidad de los módulos fotovoltaicos son: inspección visual, medición de potencia máxima, aislamiento eléctrico y una prueba adicional no destructiva como termografía infrarroja y control de calidad por inspección de luminiscencia.

Para los procesos de servicio y mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas, se deben emplear técnicas de inspección rápidas y no destructivas para poder garantizar la fiabilidad. Esto sólo puede lograrse utilizando las técnicas de imagen que sean altamente sensibles y que puedan detectar pérdidas eléctricas locales en módulos solares. Por ello, para la caracterización de muestras de silicio, la técnica de luminiscencia utilizada para la inspección fotovoltaica gana gran interés, ya que puede ser utilizada para caracterizar daños celulares locales, las resistencias en serie y shunt en los módulos solares.

Esta técnica de luminiscencia se basa en la capacidad que tienen ciertos materiales de emitir radiación electromagnética al ser excitados con una fuente de energía. Para la obtención de imágenes mediante esta técnica, toda la superficie de la muestra es excitada con el objetivo de emitir luminiscencia. En el fenómeno de emisión de luz por sólidos o moléculas bajo una excitación externa, la excitación lleva los electrones a estados excitados los cuales al volver a su estado fundamental, emiten luz.

A su vez, la caracterización de las células fotovoltaicas mediante métodos de luminiscencia presenta ciertas limitaciones, como la necesidad de realizar los ensayos en oscuridad debido a la interferencia de la luz solar con la luz de luminiscencia.

Dentro de la luminiscencia podemos encontrar varios tipos en función del tipo de energía que la origina. En este trabajo hablaremos de dos de ellas. Una de ellas es la electroluminiscencia, EL, que se produce mediante la inyección de portadores por medio de una corriente eléctrica, y la otra es la fotoluminiscencia, PL, en la que la emisión se produce por medio de la energía de los fotones. Ambas técnicas han resultado ser una rápida forma de caracterización espacial de dispositivos fotovoltaicos.

Al trabajar con células de Silicio, dichas técnicas deben ser capaces de captar su luminiscencia, cuyo espectro de emisión puede verse en la Imagen 24, que muestra que la emisión del Silicio cae en el infrarrojo y con una longitud de onda centrada en 1100nm. Por lo tanto las técnicas utilizadas para medición de luminiscencia deberán de abarcar dichas regiones.

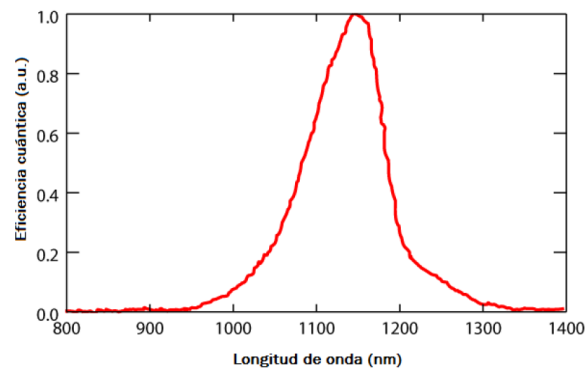


Imagen 24. Espectro de emisión del silicio

Para realizar la captura de imágenes de luminiscencia, se deben utilizar cámaras que sean lo suficientemente sensibles. Por lo general en el sector fotovoltaico se utilizan cámaras con sensores CCD (charged-coupled device) de silicio o bien cámaras con detectores InGaAs (indio-galio-arsénico), las cuales serán descritas más adelante.

A continuación se pasa a desarrollar las técnicas de fotoluminiscencia y electroluminiscencia, indicando las características de cada una y las ventajas y desventajas que presentan a la hora de hacer mediciones, para así poder determinar cuál de las dos técnicas es mejor para la caracterización de células solares en plantas fotovoltaicas. [1]

4.1.1. Fotoluminiscencia (PL)

La fotoluminiscencia es una técnica que se puede aplicar tanto en obleas como en células, que no necesita contacto, ni un tratamiento especial de las muestras y, por lo tanto, puede ser utilizada para monitorizar resultados antes, durante y después de los procesos de producción industriales utilizados en el sector fotovoltaico. Además, ha demostrado ser suficientemente rápida como para ser utilizada como una herramienta de caracterización en un entorno industrial.

La caracterización de un material mediante la técnica PL, consiste en la iluminación de la superficie de la muestra que se desea estudiar con una luz monocromática de elevada potencia óptica, mientras se utiliza una cámara específica para la adquisición de la emisión de fotoluminiscencia. Se debe prestar especial atención en evitar la captura de la luz de excitación reflejada por la muestra debido a la reflexión producida por su superficie, ya que esto puede llevar a errores sistemáticos en las imágenes obtenidas, Imagen 25.

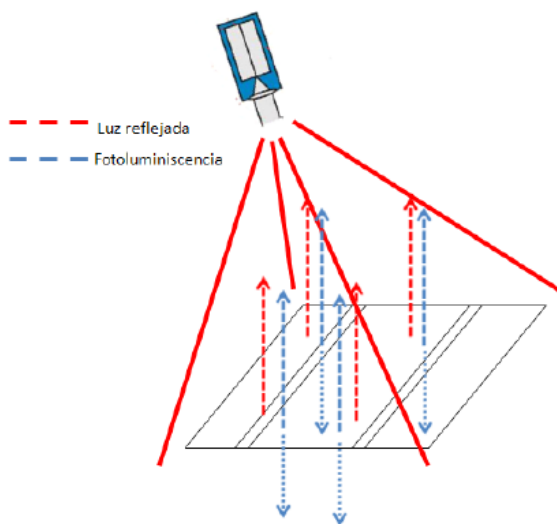


Imagen 25. En la técnica de PL el dispositivo es fuertemente excitado a través de un sistema láser. Como fruto de esa iluminación, se producen reflexiones de luz (líneas discontinuas rojas) y emisiones de luminiscencia (líneas discontinuas azules) en ambos lados de la muestra.

La distribución de la intensidad de la luminiscencia emitida está relacionada con la presencia de defectos en el material. De este modo, en el caso de las obleas y células de mc-Si, los mapas de fotoluminiscencia permiten visualizar las inhomogeneidades causadas por defectos tales como dislocaciones, fronteras de grano, acumulación de impurezas, etc. La Imagen 26 muestra dos imágenes de PL de obleas de mc-Si. La imagen de la izquierda corresponde a una oblea con una elevada concentración de defectos o impurezas, mientras que la imagen de la derecha corresponde con una oblea

con una elevada cantidad de defectos extendidos (fronteras de grano y redes de dislocaciones). [1]

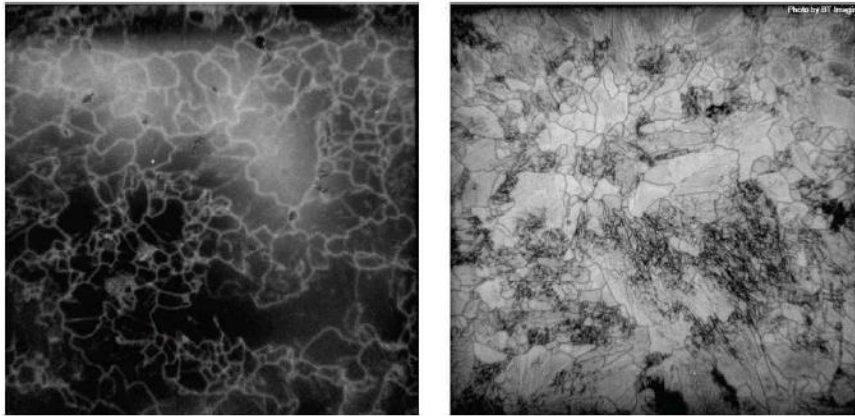


Imagen 26. Imagen de PL de una oblea con alta concentración de impurezas (izquierda) y de una oblea con alta concentración de dislocaciones (derecha)

Para el empleo de esta técnica, se debe hacer uso de una cámara capaz de capturar la luminiscencia del silicio y usar una óptica adecuada. La óptica habrá de filtrar, de la forma más efectiva posible, el espectro visible y el infrarrojo lejano, ya que, toda señal lumínica percibida por la cámara alejada de los 1100 nm no corresponderá a la luminiscencia propia de las muestras de silicio, sino que procederá de otras fuentes de luz que perturbaran la imagen resultado del ensayo de fotoluminiscencia.

Los resultados arrojados por este ensayo de fotoluminiscencia permiten evaluar cada célula para evitar posibles pérdidas de eficiencia en el panel solar fotovoltaico. En la Imagen 27 se puede ver una imagen de una célula solar de silicio multicristalino (mc-Si) emitiendo fotoluminiscencia.



Imagen 27. Captura de fotoluminiscencia de una célula solar

En las imágenes de la fotoluminiscencia de estas obleas de silicio se puede apreciar zonas más oscuras que podrán ser sinónimo de posibles defectos en la célula solar final.

Dependiendo del tipo de cámara y del tipo de ensayo realizado, se deben emplear distintos tiempos de exposición para poder tomar imágenes en las que determinar el estado de las células solares.

4.1.2. Imagen de Electroluminiscencia (EL)

La técnica de electroluminiscencia por otro lado, es un fenómeno óptico y eléctrico en el cual una unión p-n emite luz cuando se le inyecta carga. Este es uno de los principales métodos de caracterización de células fotovoltaicas debido a las ventajas que ofrece sobre otros métodos. Es una técnica de medición de gran rapidez, simple y no destructiva, que permite determinar el voltaje de funcionamiento de células solares individuales en módulos fotovoltaicos fabricados industrialmente. La adquisición de las imágenes de electroluminiscencia depende fundamentalmente del tipo de cámara que se utilice, y en general la duración de la medida se encuentra en el orden de milisegundos. Este tipo de técnica solo puede ser aplicada en una célula solar completa.

Con esta técnica, la emisión de electroluminiscencia de las células solares de silicio es directamente detectable con cámaras basadas en dispositivos de carga acoplada (CCD) sin necesidad de conversores de imágenes en el infrarrojo.

Para la caracterización de células mediante esta técnica, se hace necesario el empleo de un equipo determinado, el cual puede verse en la Imagen 28.

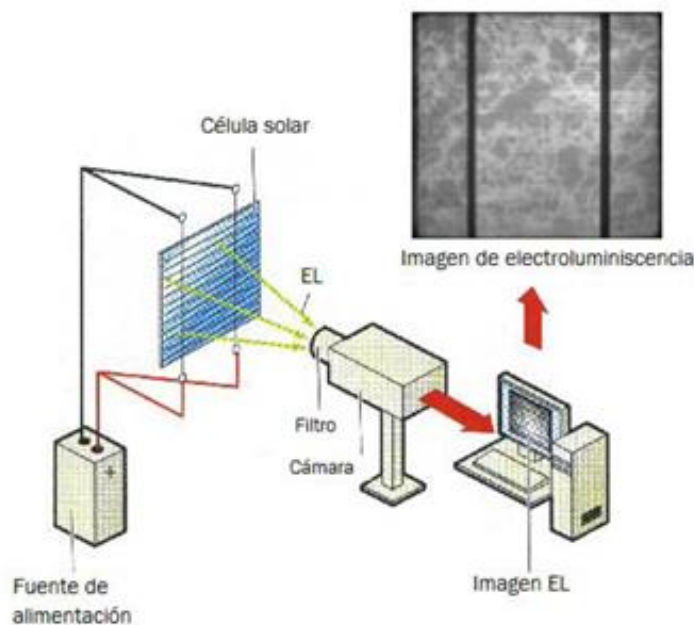


Imagen 28. Equipo para caracterización de obleas mediante electroluminiscencia

Este consta de:

- Una fuente de alimentación para la excitación de la célula.
- Una cámara especializada para captar la luminiscencia emitida.
- Un dispositivo (ordenador) conectado a la cámara para visualizar la imagen obtenida. [6]

Al excitar la célula con un voltaje de polarización adecuado, ésta emitirá luminiscencia, que será captada por la cámara. En el caso de las células de Silicio esta emisión cae en el infrarrojo, con una longitud de onda centrada en 1110 nm, como ya se ha comentado.

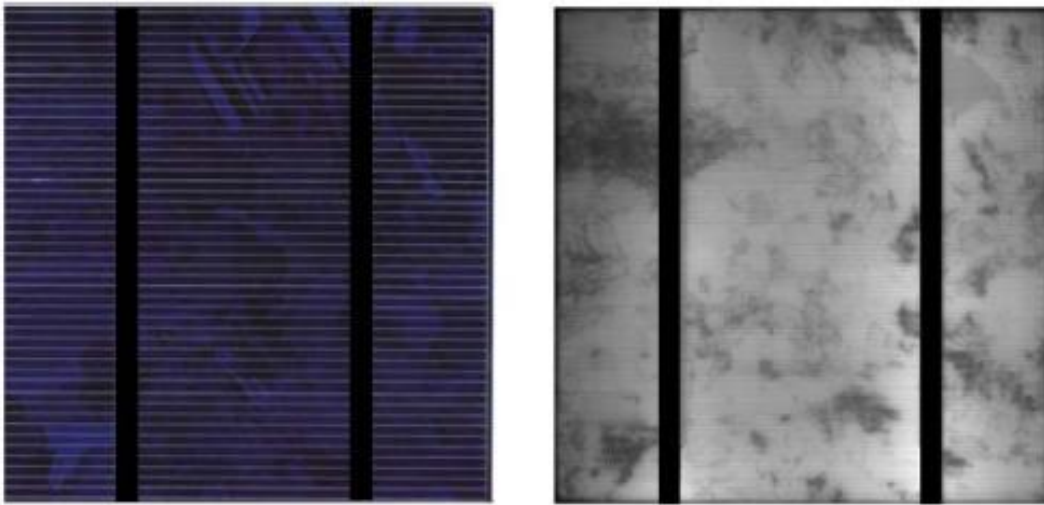


Imagen 29. Imagen de una célula solar (izda.) e imagen de electroluminiscencia de la misma célula (dcha.)

En el caso de las imágenes de EL, las zonas oscuras pueden estar relacionadas con dos tipos de defectos:

- a) Roturas en el conjunto de la célula o deterioro de un contacto que provocan el aislamiento de una parte de la célula (Imagen 30).
- b) Variación local de propiedades ópticas o electrónicas en la célula, como por ejemplo la baja longitud de difusión de portadores minoritarios en zonas cercanas a dislocaciones o bordes de grano.

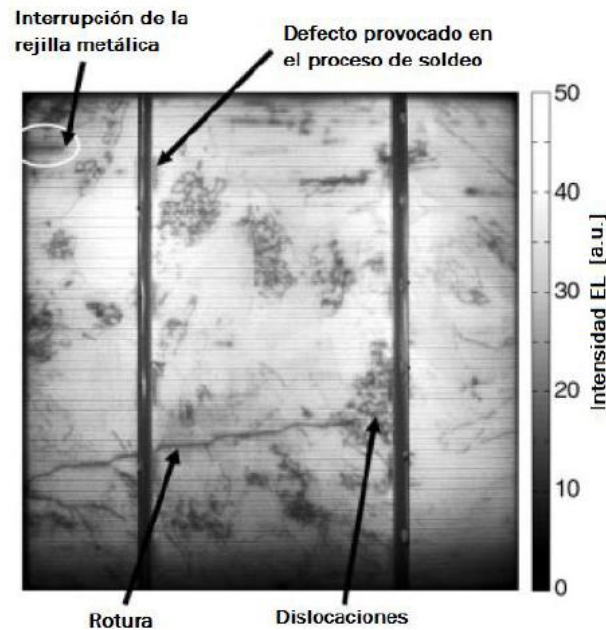


Imagen 30. Imagen de EL de una célula, las discontinuidades aparecen como zonas oscurizadas debido a que la intensidad de electroluminiscencia es muy baja. De esta manera resulta sencillo identificarlas en una imagen

Para la caracterización por medio de la técnica EL, la excitación se produce mediante la polarización en directa la unión p-n existente en la célula, mediante la inyección de portadores por medio de una fuente de corriente externa. Esta polarización produce la recombinación de portadores y la emisión de luminiscencia, la cual será capturada por una cámara de iguales o similares características a la utilizada en la técnica PL, Imagen 31. En este caso, la única luz presente es la luminiscencia emitida por la célula. La captura de luz es más sencilla porque no hace falta eliminar la luz reflejada, pero si hay que eliminar la luz ambiental parásita.

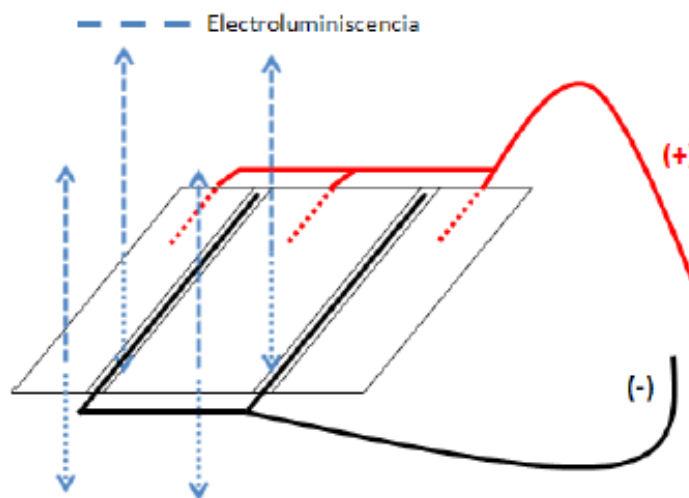


Imagen 31. Técnica EL

Esta técnica de imagen, es lo suficientemente sensible como para detectar no sólo varios procesos de recombinación radiativa en células solares de silicio, sino que también permite detectar fenómenos de degradación inducidos por la humedad en células solares orgánicas. A su vez, permite aplicaciones de luz diurna al aire libre.

Por ello, el método de electroluminiscencia (EL) se emplea para determinar los valores de la longitud efectiva de difusión local L_{eff} , la longitud de la colección de portadores L_c , así como la tensión de unión local y la resistencia en serie de células solares. Esto se consigue capturando imágenes EL bajo diferentes condiciones operativas y utilizando filtros ópticos que controlan el espectro de luminiscencia detectable. Con esta técnica, es posible detectar varios daños en el módulo fotovoltaico, tales como microfisuras, interrupciones dentro de la rejilla metálica de la célula solar, derivaciones entre la base y el emisor, así como interrupciones de los interconectores eléctricos. [1]

A su vez, la técnica de caracterización de la electroluminiscencia (EL) ha sido ampliamente utilizada para investigar espacialmente los factores limitadores de la eficiencia de las células solares parcialmente y totalmente procesadas.

También ha sido utilizada como una robusta herramienta de caracterización autónoma para la caracterización de una amplia gama de células solares de película fina. Además, la formación de imágenes EL se revela como una técnica adecuada para investigar el efecto de los cambios inducidos por iluminación reversible en el dispositivo.

4.1.3. Comparación de ambas técnicas

Haciendo un estudio sobre el empleo de estas técnicas para la caracterización de células, se puede decir que ambas poseen ciertos inconvenientes relacionados con la resolución espacial y los tiempos de medida que ofrecen, ya que son técnicas basadas en un conjunto de puntos mapeados sobre las muestras, lo que conlleva largos tiempos de medida para obtener las mejores resoluciones.

Con su conocida utilidad para medir varios parámetros de materiales fotovoltaicos, PL y EL tienen muchas aplicaciones prácticas en el terreno industrial de fabricación fotovoltaica. Estas técnicas ya son usadas en equipos de test y herramientas de medida, por ejemplo para investigar el bajo rendimiento de células solares o para controles aleatorios de obleas. Existen perspectivas realistas que revelan la utilidad de un desarrollo in-line para la

clasificación y agrupación de obleas, feedback en los procesos de control (por ejemplo, correcciones de una etapa de proceso defectuosa) mediante el control directo de la máquina, o a través de operadores humanos.

Una de las principales ventajas de PL, es el uso de excitación óptica y que no requiere una estructura determinada en el material (unión p-n) para el estudio de sus propiedades. Por este motivo, puede ser utilizada sobre un amplio rango de muestras incluyendo lingotes, obleas de silicio *as-cut* y obleas parcial o totalmente convertidas en células. La técnica de electroluminiscencia difiere en que la excitación se realiza mediante inyección de carga, por lo que se necesita una unión p-n definida polarizada en directa. Ambas técnicas, PL y EL, comparten el mismo sistema de captura de la emisión.

A continuación se resumen las ventajas y desventajas de ambos tipos de técnicas para la caracterización de material fotovoltaico.

FOTOLUMINISCENCIA

- **Ventajas**
 - Puede ser aplicada a lingotes, obleas *as-cut* y células finales.
 - No requiere ningún tipo de contacto con la oblea/célula.
- **Desventajas**
 - Por lo general requiere una fuente óptica de iluminación suficientemente intensa y un entorno cerrado.
 - Requiere una fuente de iluminación uniforme y métodos de corrección de no uniformidades.
 - La reproductibilidad de dos imágenes consecutivas no suele ser muy buena.

ELECTROLUMINISCENCIA

- **Ventajas**
 - Puede usarse en entornos que no estén totalmente cerrados.
 - La fuente de excitación es una simple fuente de alimentación.
 - Tiene una buena reproductibilidad entre dos imágenes consecutivas.
- **Desventajas**
 - No se puede aplicar a lingotes ni a obleas de silicio *as-cut*.
 - Requiere contacto físico por medio de un contacto en el ánodo y otro en el cátodo. [1]

En este trabajo nos interesa una técnica que nos permita hacer caracterización de células solares en plantas fotovoltaicas, es decir, en espacios abiertos y que se puedan realizar mediciones de forma rápida. Por lo tanto, la técnica que se ajusta a estas necesidades es la electroluminiscencia, ya que con la fotoluminiscencia es necesario estar en espacios cerrados y además no presenta buena reproductibilidad entre dos imágenes consecutivas.

Por ello, con este TFG se desarrollará un sistema móvil de EL, que permita hacer controles de calidad y mantenimiento preventivo de los módulos de manera rápida, para proporcionar los datos acerca de su estado a través de una serie de pruebas para identificar factores ambientales y características de diseño que podrían afectar a la vida del módulo. El objetivo a su vez es determinar las características eléctricas y térmicas del módulo y mostrar hasta donde sea posible, dentro de unos límites razonables de coste y tiempo, que el módulo es capaz de soportar exposición prolongada en climas descritos en el ámbito de aplicación. La esperanza de vida de los módulos dependerá de su diseño, el entorno y las condiciones a las que se ve expuesto.

4.2. Dispositivos de captación de luminiscencia

El empleo de unas cámaras especializadas en la captación de imágenes de luminiscencia, asegura una caracterización instantánea de paneles solares, ya sea durante la fabricación o durante las tareas de mantenimiento preventivo de una planta solar fotovoltaica.

Los dispositivos o cámaras para la captación de imágenes de luminiscencia se van a distinguir principalmente por el tipo de sensor, en nuestro caso de silicio o de InGaAs. Además de altas resoluciones espaciales, presentan largos tiempos de integración de imágenes (IIT) de aproximadamente 1seg para obtener imágenes EL evaluables.

A continuación se va a desarrollar los tipos de sensores CCD que permiten la caracterización de células solares por electroluminiscencia.

4.2.1. Cámaras CCD de silicio e InGaAs

Los sensores CCD son dispositivos que presentan gran sensibilidad a la luz, los cuales son capaces de detectar entre un 50% y un 75% de los fotones que inciden sobre ellos.

Un sensor CCD es una superficie sólida, dotada de unos circuitos que permiten leer y almacenar electrónicamente las imágenes que se proyectan sobre ella. El funcionamiento de los CCD se basa en el fenómeno físico del efecto fotoeléctrico, en el que ciertas sustancias tienen la propiedad de absorber cuantos de luz, o fotones, y liberar un electrón. En la Imagen 32 se puede ver el proceso de captación y acumulación de luz en un sensor CCD.

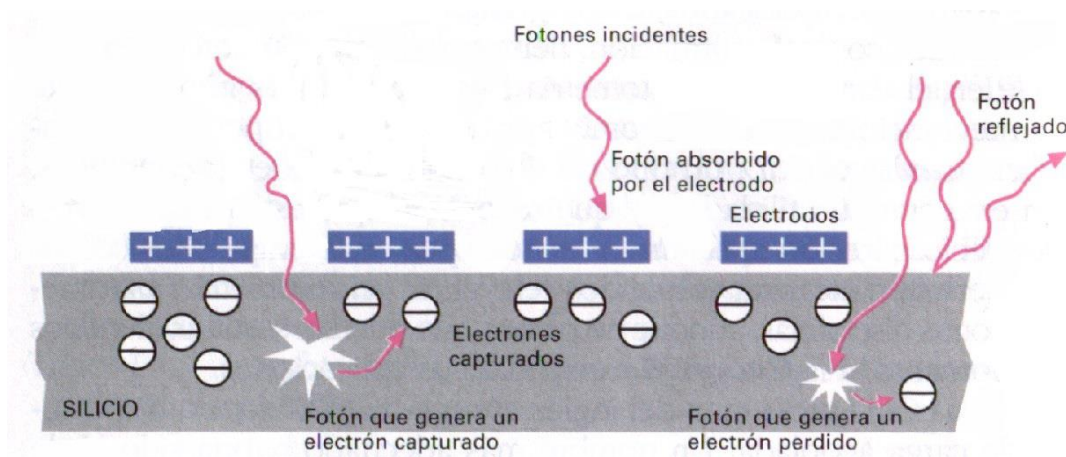


Imagen 32. Proceso de captación de electrones de un sensor CCD de Silicio

Para una cámara CCD, el detector se coloca en el plano focal de un objetivo. A continuación se abre el obturador y se permite que la luz incida sobre la superficie del detector CCD durante un cierto tiempo. Los fotones se convierten en electrones que se van acumulando alrededor de los minúsculos electrodos. Cuando la exposición ha acabado, la imagen está latente, convertida en electrones, en el interior del CCD. El siguiente paso necesario es su lectura y almacenamiento.

Para las mediciones de luminiscencia, el grupo GdS-Optronlab, está empleando sensores CCD de Silicio y de InGaAs, los cuales se detallan a continuación.

4.2.2. Cámara con sensor CCD de silicio

Las cámaras basadas en sensores de silicio son las más baratas utilizadas para la captura de emisión de luminiscencia. Presentan como ventaja una elevada resolución de imagen (en algunos casos se supera el megapíxel), pero los tiempos de integración de imagen son largos, de aproximadamente 1seg.

En cuanto a la eficiencia cuántica, este tipo de cámaras presenta valores altos para longitudes de onda comprendidos entre los 400 nm y los 1000 nm aproximadamente. Esto, en el caso de captura de imágenes de luminiscencia del silicio, resulta un inconveniente, ya que tiene su pico de emisión en torno a 1100 nm, por lo que estas cámaras sólo permiten captar la cola de la luminiscencia emitida.

Además, los detectores de Si-CCD muestran una baja eficiencia para captar la luminiscencia del silicio, ya que estos detectores están optimizados para el rango espectral de luz visible. Todo esto limita una caracterización rápida y efectiva de las obleas de silicio con una baja intensidad de emisión, que forman parte de plantas fotovoltaicas que comprenden miles de módulos fotovoltaicos. [11]

Como el silicio es un material de gap indirecto y su emisión de luminiscencia es débil, ésta última puede ser varias órdenes de magnitud inferior a la intensidad de luz de excitación que es reflejada por la muestra y que puede ser captada de forma indeseable por la cámara. Esto unido a la elevada eficiencia que presentan las cámaras Si-CCD y a la longitud de onda de excitación (valores típicos de entre 790 y 880 nm), hace necesario el uso de filtros ópticos eficientes o algún método para minimizar el efecto nocivo de la luz parásita. [7]

La cámara utilizada por el grupo GdS-Optronlab es una cámara CCD (Charged Couple Device) de silicio "Pco.1300 solar", Imagen 33. Esta cámara tiene un rango espectral de medida entre 290 nm y 1200 nm, con valores de eficiencia relativamente altos para longitudes de onda entre 400 nm y 1000 nm. Ofrece una resolución de 1424 x 1060 pixels. El resto de características técnicas de esta cámara se presentan en el Anexo 1.



Imagen 33. Cámara CCD de Si (pco.1300 solar)

4.2.3. Cámara con sensor CCD de InGaAs

Las cámaras con sensor de InGaAs superan la limitación de las cámaras de Si de emplear largos tiempos de integración de imagen, permitiendo así hacer una completa caracterización EL de módulos fotovoltaicos instalados en planta, además de presentar como ventaja una alta eficiencia cuántica en el rango espectral de emisión del silicio, pero como desventaja se puede decir que sus resoluciones suelen ser bastante menores que las de las cámaras CCD y doblan fácilmente el precio de éstas últimas.

Estas cámaras permiten la caracterización por electroluminiscencia de forma rápida, fiable y eficiente de las plantas fotovoltaicas de gran área, determinando así la degradación, el envejecimiento y su vida útil.

El grupo GdS-Optronlab también dispone de una cámara con sensor de InGaAs fabricada por Hamamatsu Photonics, modelo C12741-03, Imagen 34. Esta cámara tiene sensibilidad en un rango espectral que va de los 950 nm a los 1700 nm, por lo que es capaz de captar el pico de emisión del silicio en su rango de máxima eficiencia cuántica. La resolución que ofrece es de 640 x 512 pixels. El resto de características técnicas se presentan en el Anexo 2.



Imagen 34. Imagen de la cámara de InGaAs (Hamamatsu C12741-03) disponible en el laboratorio

Los sensores CCD presentan algunas características especiales que los diferencian de los captadores de luz tradicionales. A continuación se exponen las principales de estas características.

4.2.4. Características principales de los detectores CCD de Silicio e InGaAs

Linealidad y saturación.

Los detectores CCD de silicio e InGaAs presentan un carácter detector lineal. Esto quiere decir que la intensidad registrada en cada píxel en forma de electrones es proporcional a la luz incidente. Sin embargo, este comportamiento lineal tiene sus límites. El más obvio es el umbral de saturación.

Cuando incide mucha luz sobre el detector, la cantidad de electrones generados puede ser tan grande que los electrodos no sean capaces de retenerlos. Desde ese momento más luz no añade más electrones: el detector se satura. La saturación, de hecho, no suele ocurrir en todo el detector a la vez, sino en los píxeles más iluminados. Cuando un píxel se satura, los electrones producidos y que no puede retener emigran a los píxeles contiguos a lo largo de las columnas que conducen al canal de lectura dando como resultado una columna de píxeles saturados. En la Imagen 35 se puede ver un ejemplo de una imagen con una columna de píxeles saturados.



Imagen 35. Imagen con columna de pixeles saturados

Por lo general, los detectores de InGaAs son capaces de retener más electrones por cada electrodo, por lo que saturan a valores niveles mayores de luz, obteniendo así mejores imágenes.

La curva de sensibilidad

Al incidir los fotones en la placa semiconductor de un detector CCD de silicio o InGaAs, sólo son detectados si provocan la excitación de al menos un electrón que, además, debe ser captado por un electrodo cercano. El rendimiento con que ocurre este proceso determina la sensibilidad a la luz de un detector, y es una de las características principales de este tipo de cámaras. Este parámetro se mide mediante la cantidad llamada eficiencia cuántica. Un detector que registra la totalidad de los fotones incidentes tiene una eficacia cuántica del 100 %, mientras que uno que no detecta nada tiene una eficiencia cuántica del 0 %. La gráfica que describe la eficacia cuántica de un detector como función de la longitud de onda de la luz incidente, se llama curva de sensibilidad.

En la Imagen 36 se muestra un gráfico del espectro electromagnético de cada tipo de sensor y el de emisión del silicio, frente a la eficiencia cuántica.

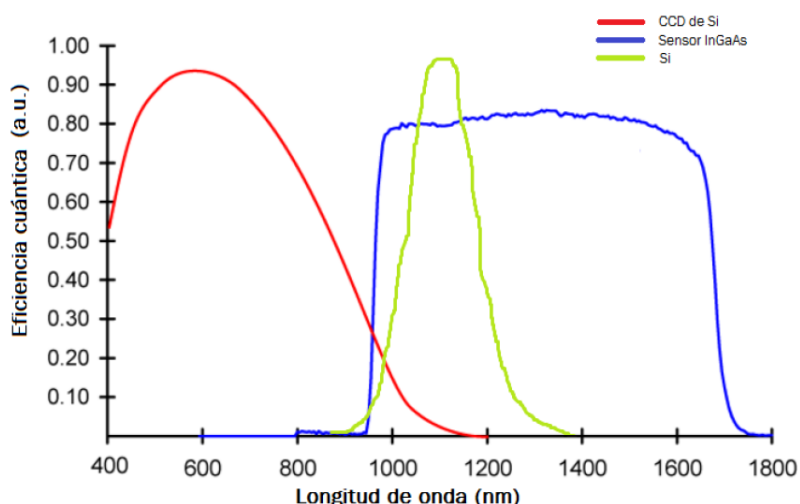


Imagen 36. Representación gráfica de la eficiencia cuántica Vs longitud de onda de un sensor CCD de Si frente a uno fabricado con InGaAs. Se muestra también la banda de emisión del Si

La curva de sensibilidad de un CCD de InGaAs, es totalmente distinta a la de un CCD de silicio. En concreto, a la longitud de onda en la que el silicio emite luminiscencia (1100 nm), la eficiencia cuántica del sensor CCD de InGaAs es notablemente superior a la del sensor CCD de silicio.

En la Imagen 36 se puede apreciar que el área del espectro de emisión del silicio captado por el sensor de InGaAs, es mucho mayor que el captado por el sensor de silicio. Además, la eficiencia del sensor de InGaAs en la banda de emisión del silicio ronda el 60% mientras que el CCD silicio apenas llega al 10%.

Recientemente se ha demostrado que se puede captar la cola de la emisión banda-banda del silicio con una cámara con un sensor Si-CCD mejorado que, aunque no disponen de la misma eficiencia que las de InGaAs, permiten abaratar los precios del equipo de captura. Así, el desarrollo de rápidos detectores CCD y de bajo ruido para estos rangos de emisión, ha logrado que los métodos de captura de imágenes en el infrarrojo, se utilicen para un gran número de aplicaciones potenciales en la caracterización espacial de células solares y el control de calidad en entornos de producción.

Señal y ruido

La señal proveniente de las cámaras CCD, viene dada por los electrones acumulados en el detector por efecto de los fotones que provienen del objeto que se desea capturar.

Cuando se realizan capturas con sensores CCD, estos no sólo registran datos provenientes del objeto del que se realiza la imagen, sino también de otras

fuentes no deseadas. A estas señales no deseadas y que también quedan registradas se les llama ruido.

El ruido da siempre lugar a incertidumbre en la medida de la señal, debido a que cada lectura es diferente y no se sabe cuál es la correcta. Cuando esto sucede, el ruido se define matemáticamente como el valor de una desviación estándar de los valores obtenidos en las diferentes mediciones efectuadas.

El ruido de lectura del sistema es uno de los parámetros más importantes de una cámara CCD, cuanto más bajo sea el ruido de lectura mayor será el rango dinámico de la cámara lo que permitirá una mayor riqueza de matices en la señal dado que el intervalo dinámico de la cámara representa el número de niveles que esta puede distinguir.

En el caso de que la cantidad de señal recibida sea muy grande, esta destaca por encima del nivel de ruido y es fácil de distinguir. En el caso de la electroluminiscencia de las células solares, la señal es muy alta, por lo que el ruido resulta difícil de percibir, se dice entonces que la relación señal ruido es alta.

La relación señal/ruido (SNR) es un término técnico utilizado para caracterizar la calidad de la detección de señal de un sistema de medición. Cuando se tiene una alta SNR es particularmente importante en aplicaciones que requieren una medición precisa de la luz. [1]

4.2.5. Proceso de medición

El proceso de medición que se emplea para la técnica de electroluminiscencia pretende mejorar la precisión de medida, para lo que se realiza un tratamiento de la imagen con una técnica en proceso de patente.

A la hora de caracterizar células, para tener una mejor relación señal/ruido, la medición es mejor realizarla con baja exposición solar. Esto será un dato a tener en cuenta en el diseño del prototipo, pudiendo ser necesario incorporar un elemento que permita reducir la exposición solar de las células en los momentos en los que se estén caracterizando.

A la hora de decidir por el tipo de sensor que emplear para las mediciones, una cámara de detector de Si tiene una menor eficiencia cuántica en el rango de longitudes de onda de la emisión dominante en Si (0.9-1.1 μm) que una cámara InGaAs; por lo tanto, para capturar imágenes de baja intensidad toma más tiempo. Por otro lado, la luz detectada por una cámara Si muestra una cierta cantidad de autoabsorción en la muestra de Si. Por lo tanto, para un



detector basado en Si, la radiación que sale de la muestra en una cierta posición proviene principalmente del entorno directo de esta posición, mientras que para un detector InGaAs o térmico, puede generarse a varios cientos de micrómetros de distancia.

Por todo ello, para este trabajo, para la caracterización de electroluminiscencia diurna de módulos fotovoltaicos instalados en planta, se empleará una cámara CCD de InGaAs.



CAPÍTULO 5. Diseño y desarrollo de un equipo de medida

El proyecto que se presenta en esta memoria surge de la necesidad de mejorar el equipo actual con el que se están llevando a cabo medidas de electroluminiscencia en plantas fotovoltaicas por parte del grupo GdS-Optronlab, del departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid. En este capítulo se presenta el diseño de varios prototipos que pretenden solventar las limitaciones del equipo actual de medición.

Hasta el momento estas medidas se están realizando gracias a un equipo formado por un trípode y una cámara de InGaAs. Dicho equipo, presenta algunas limitaciones a la hora de realizar medidas de electroluminiscencia en plantas fotovoltaicas.

A continuación, se detallará el equipo actual de medida con todos sus componentes así como los diseños realizados a partir de ese equipo, comentando las ventajas y desventajas de cada uno a la hora de realizar medidas de electroluminiscencia en plantas fotovoltaicas.

5.1. Equipo de medición de electroluminiscencia (EL)

Las plantas fotovoltaicas están continuamente expuestas a los efectos climáticos que pueden dañarlas o deteriorarlas, por lo que tienen que estar continuamente controladas para ver el estado en el que se encuentran sus células solares para garantizar que estas trabajan en su máxima eficiencia.

El grupo GdS-Optronlab, cuenta con un equipo de medida que le permite realizar caracterización por electroluminiscencia para un número no muy elevado de paneles, ya que resulta un equipo de medición lento.

Este equipo está compuesto por diferentes elementos, los cuales pueden verse en la siguiente imagen:



Imagen 37. Equipo de caracterización por electroluminiscencia

Los elementos por los que se ve formado son:

- Una **cámara de InGaAs**. Este es el componente principal del equipo, ya que es el que permite realizar capturas de electroluminiscencia de módulos solares. Esta cámara, como se comentó en capítulos anteriores, permite realizar tanto mediciones nocturnas como diurnas.
- Un **ordenador**. Este componente va conectado a la cámara, y en él se visualizan las imágenes tomadas con la cámara de InGaAs. A través de él se ve el estado de las células que componen los paneles. En este componente se almacenan las imágenes capturadas para después hacer un análisis detallado de cada panel.
- Una **fuentes de alimentación**. Este elemento es el que excita las células presentes en los paneles. A la hora de realizar las mediciones, se debe seleccionar previamente los paneles que se desean estudiar. A estos paneles se les excita con un voltaje de polarización adecuado, haciendo de esta forma que las células solares emitan electroluminiscencia y se pueda capturar de esta forma, con la cámara CCD de InGaAs, el estado de cada célula.
- **Trípode**. Este elemento es el que hace de soporte de la cámara y el que permite llegar a módulos que se encuentran a cierta altura. El trípode empleado por el grupo GdS-Optronlab permite acceder a una altura de 1.70 m.

- **Proceso de medida**

Con el equipo mostrado, el proceso de medición en planta se realiza de la siguiente manera:

Para realizar las mediciones, se debe excitar previamente los paneles que se desean caracterizar a través de la fuente de alimentación.

La cámara de InGaAs se debe posicionar de tal forma que pueda capturar los paneles solares por completo, y colocando el objetivo lo más paralelo a los mismos para obtener imágenes sin deformaciones. Esta cámara irá conectada al ordenador, para poder volcar en él las imágenes capturadas.

Una vez están emitiendo los paneles electroluminiscencia, se hacen capturas de los paneles a través de la cámara de InGaAs, pudiendo visualizar su estado en el ordenador a través del programa Labview, aplicando los procesos de corrección de imagen necesarios para poder tener una buena resolución.

Una vez realizada la caracterización de los módulos excitados, se pasa a excitar otros paneles nuevos, lo que implica a su vez el traslado de todo el equipo a la nueva posición donde se encuentren los paneles excitados.

El resultado obtenido tras la caracterización por electroluminiscencia con este equipo se puede visualizar en la siguiente imagen:

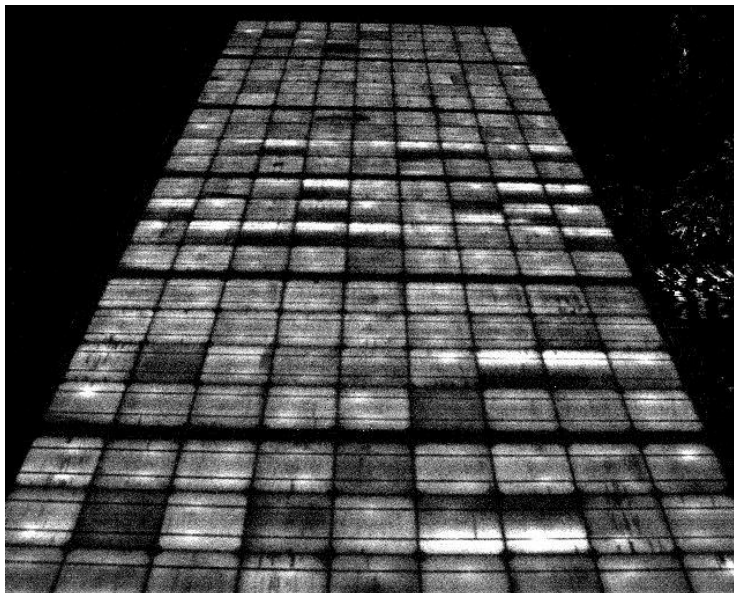


Imagen 38. Imagen de electroluminiscencia de paneles fotovoltaicos

• Limitaciones en el proceso de medida

Como puede verse, este equipo presenta una serie de limitaciones a la hora de poder caracterizar el conjunto de paneles que conforman la planta fotovoltaica. Estos problemas que surgen a la hora de realizar medidas de electroluminiscencia en planta son:

- Debido a que el trípode no da la suficiente altura a la cámara, esta forma un cierto ángulo con el panel, no pudiendo estar completamente perpendicular al mismo, por lo que las imágenes salen deformadas, como puede verse en la Imagen 38. A causa de esta inclinación ocurren dos cosas: por un lado, las células más alejadas presentan una resolución menor que las más cercanas. Por otro lado, las células presentan una cierta deformación, desde las más alejadas a las primeras, lo que implica que a la hora de determinar el estado de las células solares, puede llegar a ser laborioso determinar que fallos pueden presentar. Aunque se emplease un trípode que diera más altura a la cámara, dentro de los límites razonables de tamaño, no sería suficiente en muchos de los casos prácticos.
- Cuando se va a realizar imágenes de los diferentes paneles que hay en una planta, se debe trasladar todo el equipo para posicionarlo en la zona donde los paneles estén polarizados. Al tratarse de un equipo con varios componentes, implica invertir cierta cantidad de tiempo en ese traslado, a la vez que se debe enfocar el sensor cada vez que se desplaza la cámara, ya que su posición no será la misma que en la medición precedente. Esto supone un problema a la hora de caracterizar las células, ya que limita la productividad (módulos/hora) de la inspección.
- Hay gran presencia de cables, por lo que hacen más complicado los procesos de medición a la hora de mover el equipo.

• Mejoras propuestas

Ante esta serie de limitaciones, se propuso un conjunto de mejoras en el equipo actual de medida. Estas mejoras son:

- Posicionar el sensor CCD de InGaAs de tal forma que se encuentre paralelo a los paneles para obtener imágenes de electroluminiscencia con las mínimas deformaciones.
- Realizar una estructura que permita acceder a los paneles que se encuentre a más altura y más alejados, pudiendo de esta forma caracterizar mayor número de paneles presentes en las plantas fotovoltaicas

- Realizar una estructura ligera que permita servir de soporte para ordenador y fuente de alimentación y a su vez permita desplazarlos de forma rápida a lo largo de las plantas fotovoltaicas.

Para ofrecer unos mejores resultados a la hora de caracterizar células solares, un parámetro muy importante es la distancia de la cámara a los paneles. Este parámetro se determina en el siguiente punto.

5.2. Distancia de la cámara a los paneles

En la caracterización de células solares presentes en plantas fotovoltaicas, para poder obtener imágenes de los paneles completos, se deberá determinar previamente la distancia a la que habrá que colocar la cámara de los paneles solares.

Cálculo del ángulo de visión en función de la distancia focal y el tamaño del sensor

El ángulo de visión es función de la distancia focal y el tamaño del sensor; viene dado por la ecuación:

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{S}{2 \cdot f \cdot (m + 1)}\right)$$

donde α es el ángulo de visión, que puede ser del lado horizontal, α_H , como del vertical α_V , S el tamaño del sensor, que puede ser tanto del lado vertical, S_V , como el horizontal S_H , f la distancia focal y m el factor de magnificación. Para distancias de enfoque grandes ($m \approx 0$), queda:

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{S}{2 \cdot f}\right)$$

Una vez tenemos ese ángulo, calcularemos la distancia del módulo a la cámara, aplicando trigonometría con las siguientes fórmulas:

$$V = \frac{1}{\tan(\alpha_V/2)}$$
$$H = \frac{1}{\tan(\alpha_H/2)}$$

Se tomó diversos objetivos con distinta distancia focal, lo cual permite que la distancia de la cámara a los módulos sea menor. La cámara se tomó la misma para ambos casos, la de InGaAs C12741-03 que tiene el

departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid. Con ello se obtuvieron los siguientes resultados.

Columna1	Distancia focal (mm)	Ángulo de visión (V)	Ángulo de visión (H)	Tamaño módulo	Distancia cámara máxima (m)
Cámara InGaAs C12741-03	16	35.4893	43.6028	2 x 1	2.50
Cámara InGaAs C12741-03	12	46.2127	56.1450	2 x 1	1.8750
Cámara InGaAs C12741-03	8	65.2385	77.3196	2 x 1	1.2500
Cámara InGaAs C12741-03	6	80.9505	93.6952	2 x 1	0.9375
Cámara InGaAs C12741-03	16	35.4893	43.6028	1.515 x 0.984	1.8938
Cámara InGaAs C12741-03	12	46.2127	56.1450	1.515 x 0.984	1.4203
Cámara InGaAs C12741-03	8	65.2385	77.3196	1.515 x 0.984	0.9469
Cámara InGaAs C12741-03	6	80.9505	93.6952	1.515 x 0.984	0.7102

Tabla 1. Distancia desde la cámara al módulo en función de la distancia focal del objetivo y del tamaño del módulo

Para los cálculos se tomó como tamaño del sensor en vertical 10.24 mm y en horizontal 12.8 mm.

El objetivo que permite situar la cámara lo más cerca posible de los paneles, como puede observarse en la anterior tabla, es el de distancia focal de 6mm, donde para un panel de tamaño 2 x 1 m, que son los más grandes actualmente, la cámara debería situarse a una distancia de 0.9375 m. Para el caso de un módulo típico de tamaño 1.515 x 0.984 m, la distancia con dicho objetivo sería de 0.7102 m.

Esa distancia sería la mínima a la que habría que colocar la cámara respecto al módulo para que permitiese captar el módulo en su totalidad. Si se fuese a plantas que tuviesen distintos tamaños a los mostrados en la tabla anterior,

simplemente habría que cambiar en la fórmula que se muestra al principio los valores de tamaño del módulo y con ello obtendríamos la distancia a la que tendría que ir la cámara.

Una vez determinados todos estos parámetros, se pasó a diseñar una serie de prototipos que permitiesen solventar las limitaciones vistas hasta ahora.

A continuación se detallan los prototipos diseñados.

5.3. Prototipos realizados

Primer prototipo

Ante los problemas y mejoras comentadas, se pensó en un primer prototipo que pudiese solventar todos esos problemas en el proceso de caracterización por electroluminiscencia de células solares.

Se partió de la idea de colocar el sensor CCD paralelo a los paneles y de conseguir realizar las mediciones lo más rápido posible.

Para este prototipo se pensó en un sistema que sirviese de soporte tanto para el ordenador como para la fuente de alimentación, que fuese móvil y ligero. A su vez, se pensó en otro sistema que permitiese acercar la cámara a los paneles más alejados y que pudiese regular la posición de la cámara para colocar el sensor paralelo a cada panel que se midiese.

Para permitir acercar la cámara a los paneles más alejados, se pensó en el empleo de una barra en la cual iría acoplada la cámara. Esta barra a su vez, iría colocada sobre el trípode que forma parte del equipo actual de medida, dotando de esta forma de altura a la cámara.

La posición y orientación de la cámara será función de la inclinación que presenten los paneles. Para regular la orientación se empleará un soporte para cámaras, el cual presenta una rótula que permitirá regular esa posición. A continuación, se muestra el diseño elaborado:

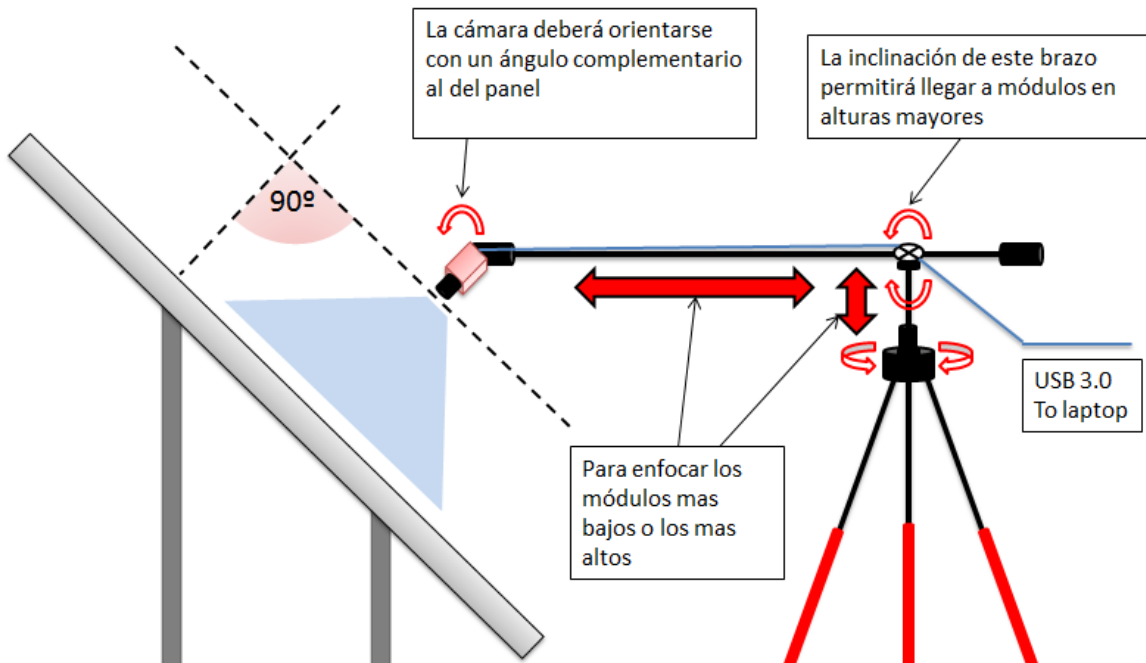


Imagen 39. Diseño primer prototipo del equipo de caracterización por EL

En cuanto al soporte móvil de ordenador y fuente de alimentación, el diseño que se pensó se muestra en la siguiente imagen:

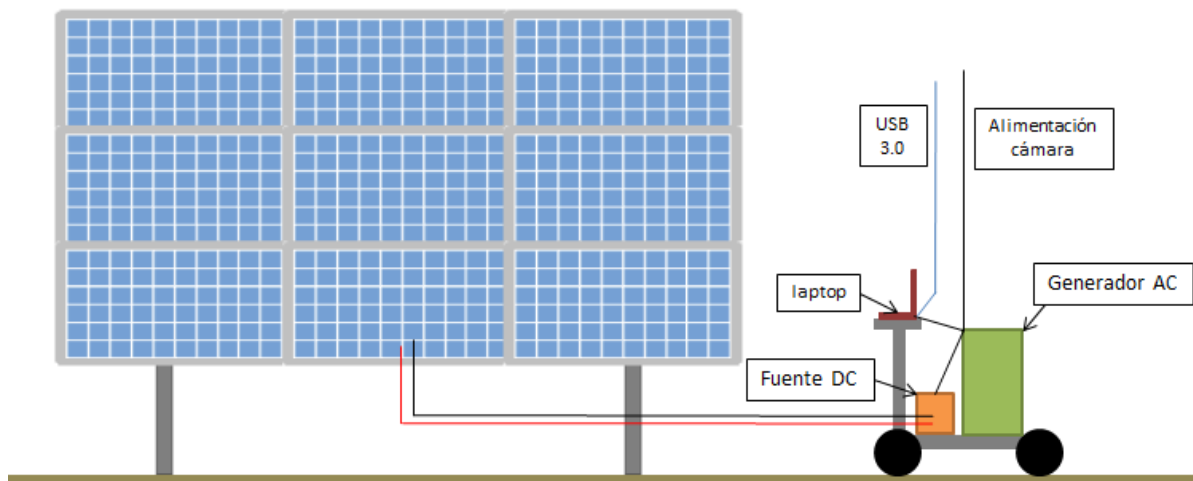


Imagen 40. Segundo componente del primer prototipo de caracterización por EL

Este sistema contaría con una estructura que tuviese un soporte para colocar el ordenador, y de esta forma trabajar de una forma más cómoda. A su vez, se podría posicionar la fuente de alimentación en su base, para permitir de esta forma transportar a la vez tanto ordenador como fuente. Esta estructura está

sustentada sobre unas ruedas, que son las que permitirán que se realice los desplazamientos a lo largo de las plantas fotovoltaicas, no teniendo que cargar con los distintos elementos del equipo.

Con este diseño, se pasó a realizar un prototipo del mismo, empleando para ello materiales que fuesen ligeros y de fácil manejo. A continuación se muestra el prototipo realizado.

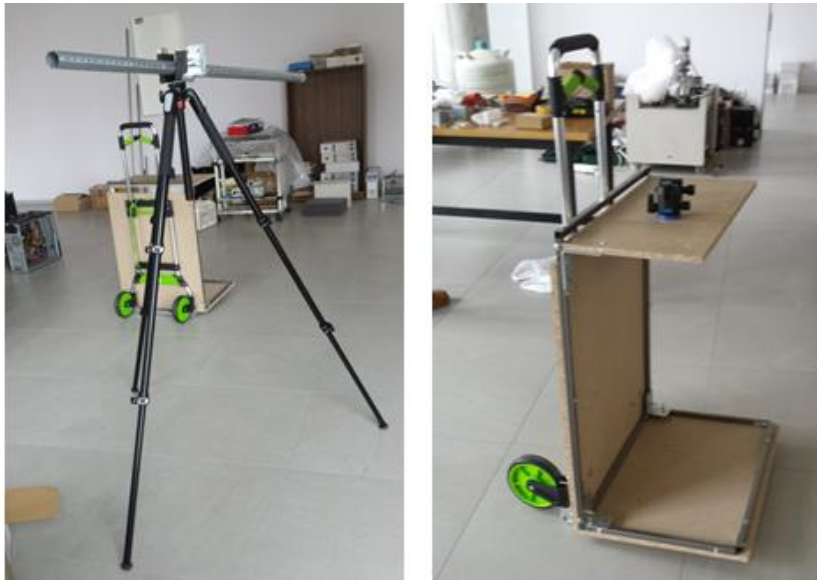


Imagen 41. Componentes del primer prototipo de caracterización por EL.

En la imagen de la izquierda se puede ver la barra donde iría la cámara. Esta barra está unida al trípode a través de un perfil en U al que se encuentra unido por un tope que atraviesa a ambos y permite sujetar la barra en una posición fija. Para la regulación de la longitud de la barra, esta cuenta con una serie de orificios a lo largo de toda ella, y a través de esos orificios se pasará el tope que une la barra con el perfil en U, ajustando la longitud a la que se posicionará la cámara en función de las necesidades de medida.

Por otro lado, en la imagen de la derecha, se ve la estructura en la que iría ordenador y fuente de alimentación. Se trata de una carretilla dotada de un soporte para el ordenador y una base para colocar la fuente de alimentación.

Se pasó a comprobar la utilidad de dicho equipo, llevándolo a una planta fotovoltaica ubicada en Yunquera de Henares, para realizar una serie de caracterizaciones por electroluminiscencia. Para estas mediciones se llevó solamente el sistema formado por la barra y el trípode, ya que el carro, por problemas logísticos, no se pudo trasladar a esta planta. Con estas mediciones se pudo ver si realmente era útil y más ventajoso que el equipo de medida actual.

En la siguiente imagen se puede ver un proceso de medida en dicha planta fotovoltaica con este equipo:



Imagen 42. Proceso de medida de EL en planta fotovoltaica mediante el primer prototipo

A partir de estas mediciones en planta, se pudo llegar a sacar una serie de conclusiones en la utilización de este equipo para la medición de electroluminiscencia en plantas fotovoltaicas.

Se pudo ver que el empleo de dicho equipo presentaba una serie de problemas que impedían realizar de forma correcta las mediciones, a la vez que no solventaba los problemas que surgían con el equipo inicial de medida.

Con este nuevo equipo se vieron los siguientes problemas:

- Como se puede ver en la Imagen 42, a pesar de ser una barra de gran longitud, esto no elimina el problema de llegar a módulos que están más alejados, ya que no es lo suficientemente larga como para poder llegar a ellos.
- La barra no es extensible ni regulable en longitud, por lo tanto no resulta cómoda a la hora de transportarla.
- Los suelos de las plantas fotovoltaicas son bastante irregulares, por lo que resulta difícil realizar el transporte del soporte de fuente y ordenador. A su vez, se trata de una estructura muy robusta, lo que supone un inconveniente cuando se necesita trasladar a una zona donde realizar mediciones.

- Al estar la cámara en voladizo en la barra, es muy sensible ante efectos exteriores como el viento, por lo que a la hora de realizar mediciones hay muchas vibraciones, aún con un ligero viento, como fue el caso de las mediciones que se realizaron el día 10 de Marzo de 2017, donde el aire era mínimo.
- Cada vez que se desplaza la cámara hay que enfocar su objetivo, ya que la distancia de la cámara a los paneles no es siempre la misma.

Segundo prototipo

A raíz de las mediciones realizadas en Yunquera de Henares, se vio la necesidad de crear un diseño totalmente distinto que cumpliera con las necesidades comentadas. En este diseño, se planteó que el equipo fuese sobre los paneles solares, resultando de esta forma más fácil de trasladar entre paneles. Se pensó en un equipo que permitiera solventar tanto los problemas vistos en el equipo que se está utilizando ahora para las mediciones como para los problemas del primer prototipo.

El segundo prototipo que se diseñó fue el que se muestra en la siguiente imagen:

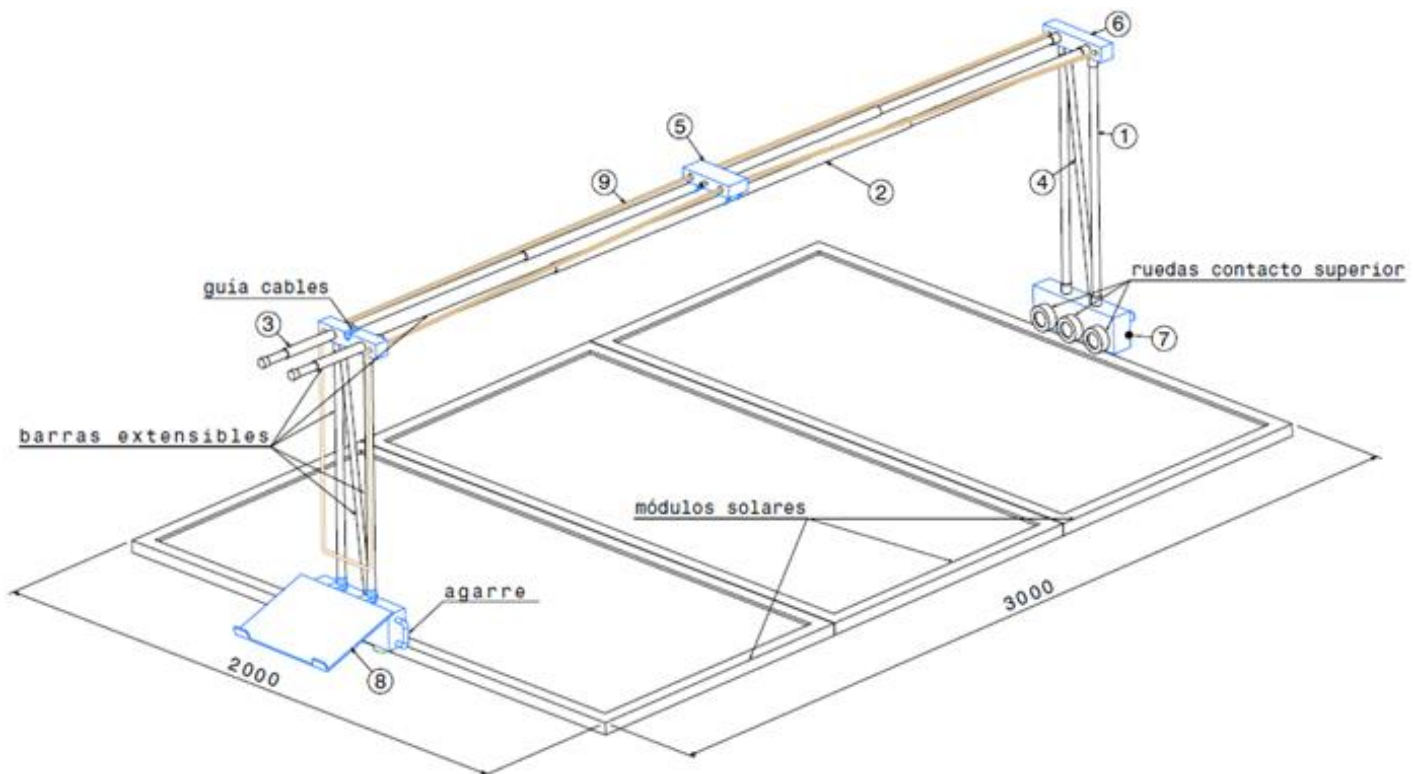


Imagen 43. Segundo prototipo de caracterización de EL

Como puede verse, los elementos de los que consta dicho prototipo son:

1. Cuatro barras extensibles de longitud máxima de 1 m y perfiles tubulares redondos.
2. Dos barras extensibles, de longitud máxima de 3 m, con perfiles tubulares redondos.
3. Dos barras extensibles, de longitud máxima 500 mm, con perfiles tubulares redondos.
4. Dos barras extensibles, de longitud máxima de 1004 mm, con perfiles tubulares redondos que cumplen la función de dar más resistencia a la estructura ante esfuerzos externos
5. Soporte para cámara, de dimensiones 200 x 80 x 40 mm
6. Dos cuerpos prismáticos de dimensiones 200 x 50 x 50 mm, ubicadas en los extremos, que sirven de unión para las barras verticales y las horizontales
7. Dos cuerpos prismáticos de dimensiones 350 x 120 x 70 mm, que soportan las barras verticales y a su vez son el soporte de todo el equipo, contando cada uno con 6 ruedas de goma que son las que permiten el movimiento del equipo
8. Un soporte para ordenador
9. Un cable atirantado que irá a lo largo del equipo cuya función será permitir el movimiento del soporte de la cámara.

Dichos elementos serán de diferentes materiales en función de si deben soportar una mayor o menor carga. Los elementos representados en negro en la Imagen 43 (a excepción de los paneles solares y las ruedas) serán de acero, ya que estos soportarán unos esfuerzos mayores y tendrán que ser más resistentes. Los elementos representados en azul, por otro lado, serán de aluminio, ya que estos soportarán menores esfuerzos y permitirán de esta forma que la estructura sea más ligera.

Los perfiles de las barras serán todos tubulares circulares, de distintas dimensiones. Los diámetros de las barras variarán en función de los esfuerzos que tengan que soportar. Las medidas de cada componente vienen en los planos que se encuentran en los anexos.

Con estos datos, se estimó el peso que podría tener la estructura completa, obteniendo un valor de 56 kg.

Este prototipo está pensado para poder llegar a medir hasta 4 paneles que se encuentren consecutivos. Las barras indicadas en la Imagen 43 con el número 2, pueden extenderse hasta una longitud de tres metros, lo que permite abarcar tres módulos que se encuentren consecutivos, con una medida de 2 x 1 m, que son los de mayores dimensiones que hay en el

mercado. Por otro lado, las barras indicadas con el número 3 permiten llegar a una longitud de 0.5 m, las que permiten medir un panel a mayores.

El que este prototipo esté conformado por barras extensibles, hace que se pueda regular tanto la altura del equipo como el ancho del conjunto. La regulación del equipo en altura es esencial, ya que la altura a la que posicionar la cámara depende del tamaño de los módulos y del objetivo de la cámara. La distancia a la que esté la cámara debe permitir capturar un panel completo.

La posición de la cámara en este equipo irá perpendicular a los paneles, sobre un soporte al que irá roscada a través de un saliente que presenta. Este soporte deslizará a lo largo de las barras horizontales que unen ambos extremos del equipo, gracias a un cable al que va unido. En la siguiente imagen se ve en detalle el soporte de la cámara para este prototipo.

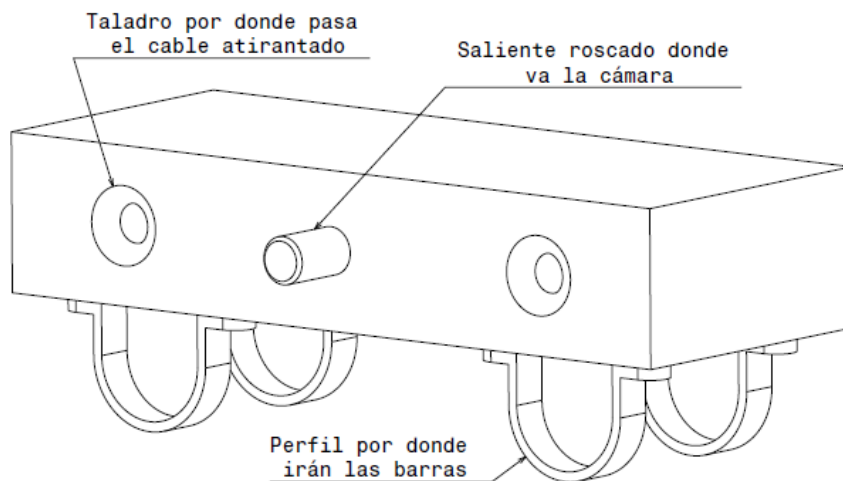


Imagen 44. Soporte cámara CCD para el segundo prototipo

El saliente que presenta este soporte, va roscado con la misma métrica que el orificio de la cámara. A su vez, cuenta con dos taladros a los laterales por donde va el cable atirantado que se encargará de desplazar dicho soporte. En la parte inferior del cuerpo, cuenta con cuatro perfiles que sirven de agarre a las barras y que hacen que pueda deslizar a lo largo de ellas.

De esta forma, garantizamos que durante los procesos de medida, el sensor de la cámara vaya siempre paralelo a los paneles, sin necesidad de tenerla que mover de su posición una vez colocada en este soporte.

El sistema que mueve el soporte de la cámara se puede ver representado en la Imagen 43 en color marrón. Este mecanismo se basa en un cable atirantado que va unida al soporte de la cámara y a los extremos del equipo. Para conseguir desplazar la cámara a lo largo de todos los paneles, se debe

tirar hacia abajo del cable por uno de los dos extremos, señalados cada uno con una flecha de distinto color (rojo y negro) según se quiera desplazar el soporte para un lado u otro del equipo.



Imagen 45. Sistema de movimiento del soporte de la cámara en el segundo prototipo

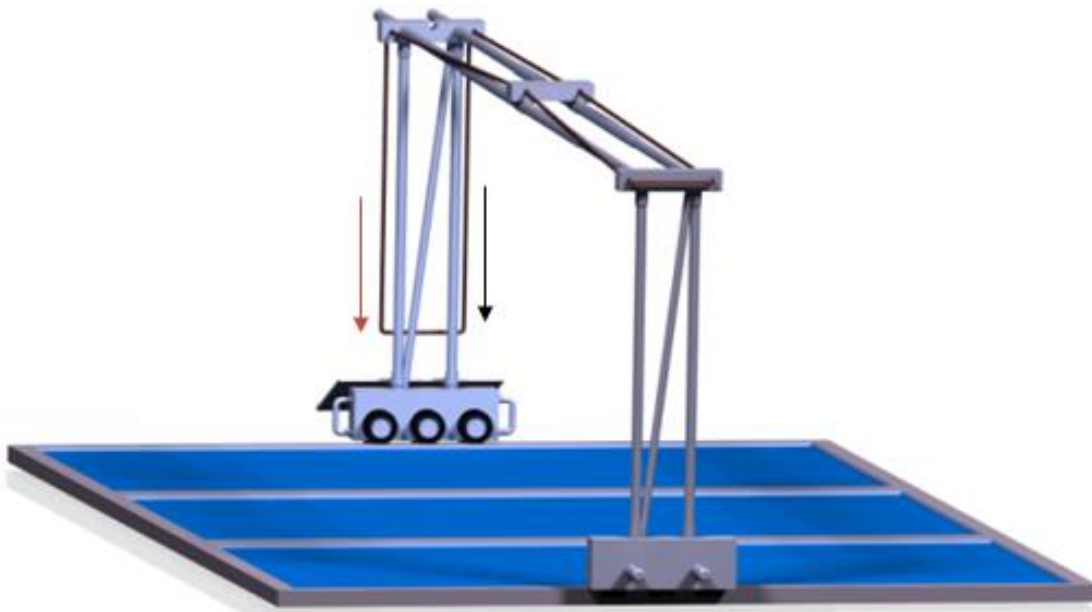


Imagen 46. Sistema de movimiento del soporte de la cámara en el segundo prototipo (2)

En cuanto al apoyo del prototipo, irá sobre un conjunto de ruedas de goma, las cuales deslizarán por los paneles. Para mover el equipo a lo largo de los paneles, simplemente habrá que empujarlo a través de los agarres laterales que presenta este apoyo. Este elemento se representa más detalladamente en la Imagen 47:

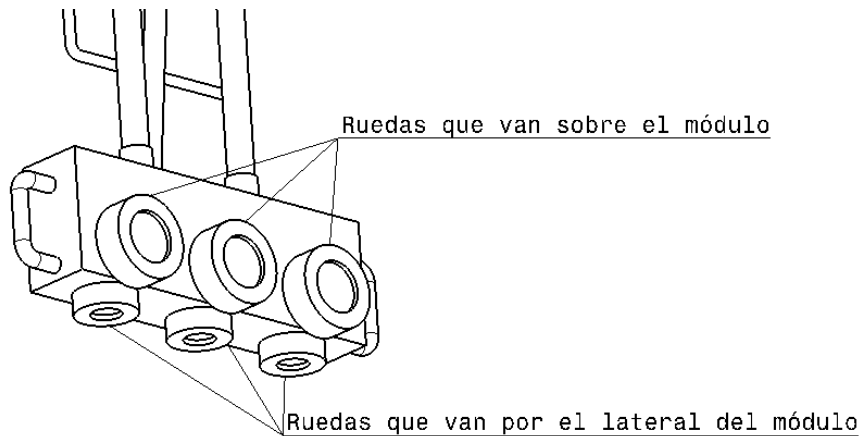


Imagen 47. Detalle soporte del segundo prototipo

Las ruedas que presenta cumplen varias funciones, además de permitir desplazar de forma fácil la estructura y servir de soporte a la misma, las ruedas que van por el lateral del módulo hacen de sujeción de la estructura para que no vuelque o caiga, ya que debido a que los módulos presentan una cierta inclinación en planta, si no estuviesen estas ruedas, la estructura vencería hacia delante y no se podría mantener una trayectoria uniforme a lo largo de los módulos cuando se desplaza el equipo.

Estas ruedas tendrán que salvar la distancia que hay presente de módulo a módulo, por lo que su tamaño deberá ser mayor que dicha separación. Estarán fabricadas de goma, para no dañar los módulos cuando pasen sobre ellos, y a su vez ofrezcan cierta adherencia para que no deslicen.

En la siguiente imagen se puede ver la posición de las ruedas respecto a los módulos:

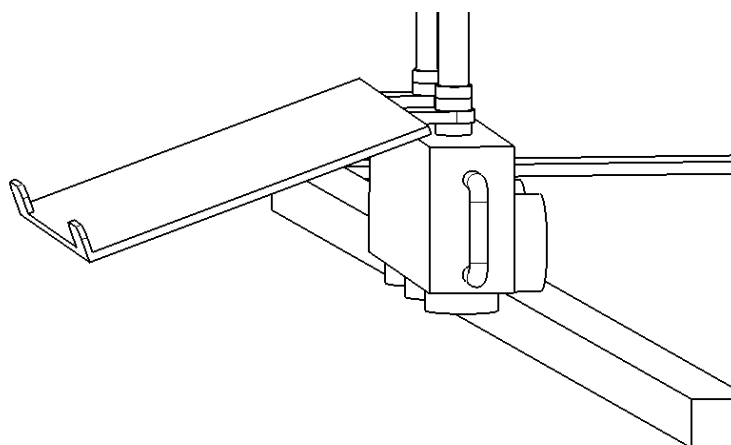


Imagen 48. Posición de las ruedas respecto de los paneles solares

En cuanto al problema del cableado, se hizo en uno de los laterales un dispositivo giratorio en forma de doble cono por el que podrían moverse los

cables de la cámara cuando esta se desplace para medir los diferentes módulos de los strings. En la siguiente imagen se muestra el dispositivo diseñado:

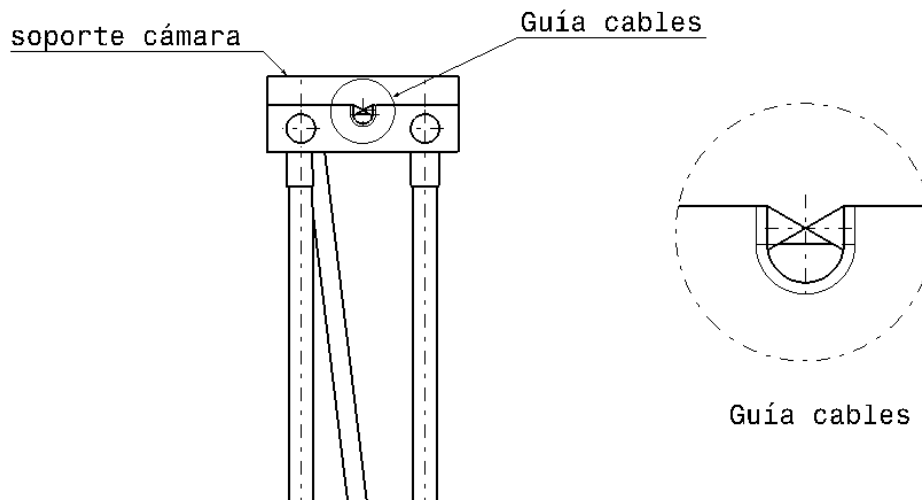


Imagen 49. Detalle guía para cables

- **Proceso de medida**

A la hora de realizar medidas con dicho prototipo, el proceso que hay que seguir es el siguiente.

Como se trata de una estructura desmontable, lo primero que hay que hacer es unir todas las partes de la estructura regulándola a las dimensiones necesarias de los paneles que haya que caracterizar. A su vez, habrá que regular la altura del equipo teniendo en cuenta para ello el tamaño de los paneles que se vayan a caracterizar y el sensor que se emplee para ello.

Una vez montada la estructura, se debe posicionar sobre los módulos. Para colocar dicha estructura, se sujetará mediante los agarres que tiene en los laterales.

Cuando la estructura esté sobre los paneles, se posicionará el ordenador en su soporte y se conectará a la cámara de InGaAs para realizar las mediciones.

A partir de aquí lo único que habrá que hacer será deslizar la estructura a lo largo de los paneles ayudándose de los agarres que presenta y moviendo a su vez la cámara de posición para ir capturando los distintos paneles.

El que el equipo vaya sobre los módulos permite que las mediciones se realicen más rápido, ya que el tiempo que se invertiría en moverse a lo largo de los paneles sería inferior al empleado en el equipo inicial.

- **Ventajas que presenta este prototipo**

A la hora de realizar mediciones con este prototipo, las mejoras y ventajas que se encuentran en comparación con el primero son:

- El empleo de este mecanismo nos permitirá realizar las mediciones de forma rápida y cómoda.
- Obtendremos imágenes de electroluminiscencia sin deformaciones gracias a que el objetivo de la cámara se encuentra paralelo a los paneles.
- Nos permite realizar captura por electroluminiscencia de todos los paneles que se encuentren conformando strings, incluso los más alejados.
- Se trata de un equipo desmontable, por lo que su transporte se puede realizar de forma sencilla.
- Presenta una plataforma de ordenador incorporada, por lo que ordenador y cámara irán en el mismo equipo.
- No es necesario enfocar la cámara cada vez que se desplaza a lo largo de los strings, ya que esta se encuentra siempre a la misma distancia de los paneles.

- **Estudio estructural**

Una vez establecido el diseño del prototipo, con todas las medidas de cada elemento, se pasó a hacer un estudio estructural para ver su resistencia ante efectos externos como la acción del viento o el propio peso de la estructura.

Este estudio se realizó con el módulo de Catia V5 Generative Structural Analysis. Se tomó la estructura del diseño, eliminando algunos de sus componentes como el cable atirantado que une la sujeción de la cámara, ya que este elemento no es relevante a la hora de calcular las deformaciones estructurales. Se le aplicó a la estructura una serie de fuerzas y presiones para los estados límite que puede llegar a soportar la estructura. Los esfuerzos a los que se podrá ver sometida esta estructura son el peso propio de la estructura, el peso de la cámara, y la acción del viento.

El análisis estructural se realiza suponiendo que toda la estructura está hecha de acero. Como peso de la cámara se tomó 9.8 N. Como acción del viento se toma una velocidad máxima de 100 km/h, descartando trabajar, por su dificultad obvia, con mayores velocidades de viento.

Ante estos esfuerzos, el resultado es el siguiente:

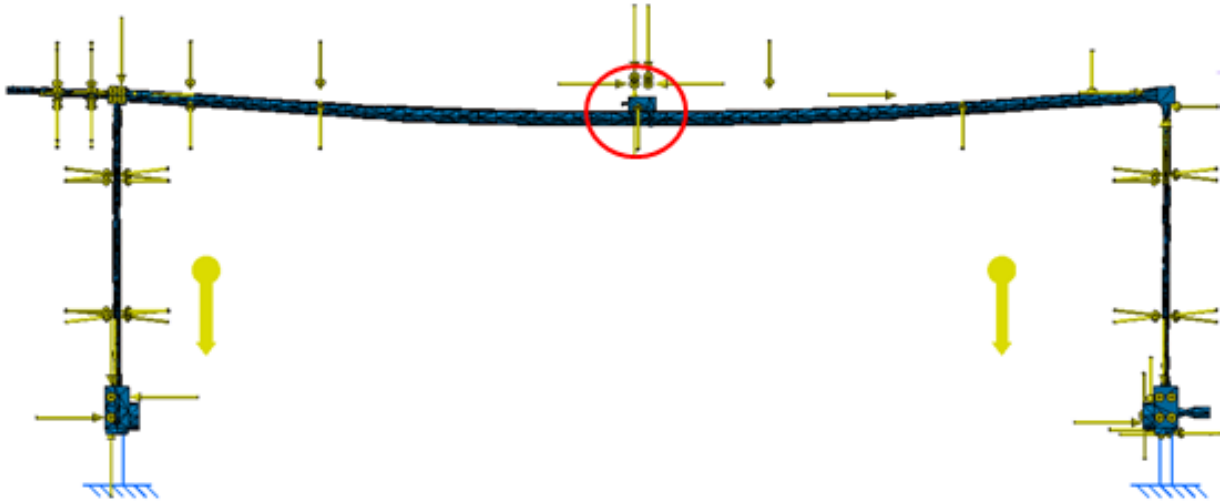


Imagen 50. Deformaciones estructurales en el segundo prototipo

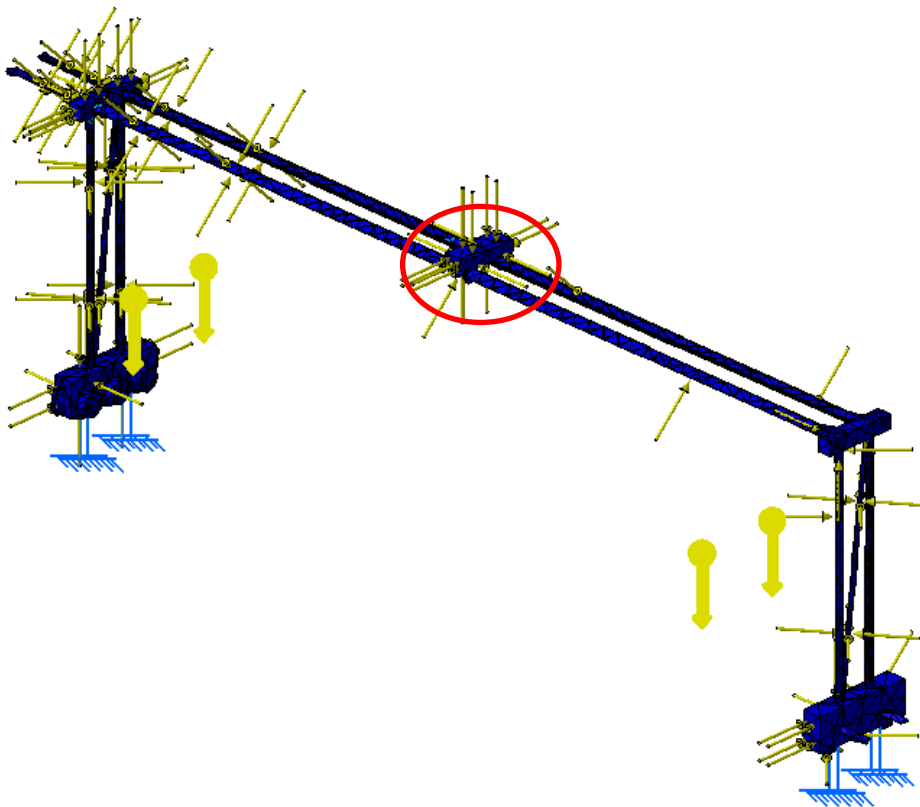


Imagen 51. Deformaciones estructurales en el segundo prototipo (2)

Como se puede ver, la zona que más se deforma en la parte media de las barras horizontales, señalado con un círculo rojo. Esto es debido a que al tratarse de barras largas, con distintos perfiles y de acero, estas barras tienden a flexarse. El efecto del peso de la cámara es mínimo, ya que al quitar

el efecto de dicho cuerpo, la variación respecto a cuando está aplicado dicha carga es mínima.

La deformación de la barra está causada mayormente por el peso propio de la estructura. Esto puede llegar a ser un problema a la hora de realizar las mediciones, ya que se pretende que la estructura no se vea afectada por ninguna deformación. Esa deformación hace que la posición de la cámara varíe, por lo que puede llegar a resultar que no se tomen medidas completas del panel.

Los desplazamientos sufridos por este punto son: -0.00241 ; 0.00426 ; -0.143 mm.

El resto de características estructurales van incluidas en el Anexo 3.

Tercer prototipo

En cuanto al tercer prototipo que se diseñó, parte de la misma idea que el segundo, pero con una serie de modificaciones. Este diseño se puede ver en la Imagen 52:

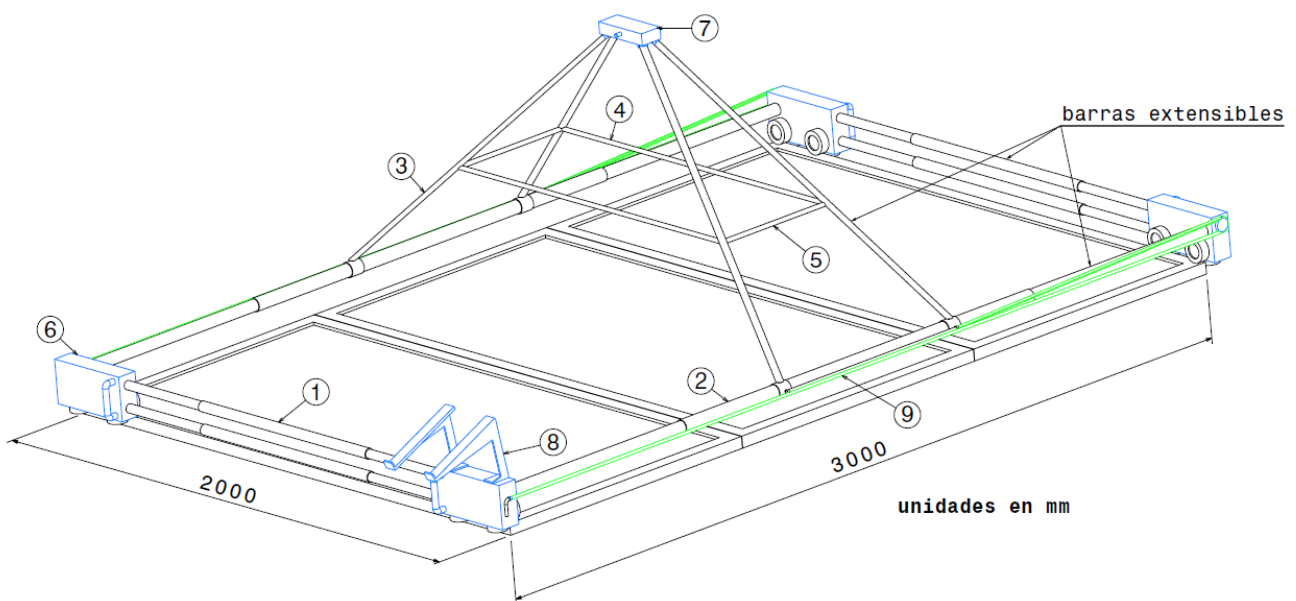


Imagen 52. Estructura tercer prototipo de medida de EL

Como puede verse en la imagen, los elementos de los que consta dicho prototipo son:

1. Cuatro barras extensibles de longitud máxima de 2 m y perfiles tubulares redondos.

2. Dos barras extensibles, de longitud máxima de 3 m, con perfiles tubulares redondos.
3. Cuatro barras extensibles, de longitud máxima 1280 mm, con perfiles tubulares redondos.
4. Dos barras extensibles, de longitud máxima de 1195 mm, con perfiles tubulares redondos que dotarán de mayor resistencia a la estructura ante esfuerzos externos
5. Dos barras extensibles, de longitud máxima de 418 mm, con perfiles tubulares redondos que también dotarán de mayor resistencia a la estructura ante esfuerzos externos
6. Cuatro cuerpos prismáticos de dimensiones 300 x 150 x 70 mm, que sirven de unión para las barras horizontales
7. Soporte para cámara, de dimensiones 200 x 80 x 40 mm
8. Un soporte para ordenador
9. Un cable atirantado que irá a lo largo del equipo cuya función será permitir el movimiento del soporte de la cámara.

Dichos elementos serán de diferentes materiales en función de si deben soportar una mayor o menor carga. Los elementos representados en negro (a excepción de paneles solares y ruedas) en la Imagen 52 serán de acero, ya que estos deberán soportar unos esfuerzos mayores y tendrán que ser más resistentes. Los elementos representados en azul por otro lado serán de aluminio, ya que estos soportarán menores esfuerzos y permitirán de esta forma que la estructura sea más ligera.

Los perfiles de las barras serán todos tubulares circulares, de distintas dimensiones, debido a que se trata de barras extensibles. Los diámetros de las barras varían en función del esfuerzo que deban soportar. Las dimensiones de cada componente vienen especificadas en los planos que se encuentran en los anexos.

Con estos datos, se estimó el peso que podría tener la estructura completa, obteniendo un valor de 54 kg.

Este prototipo está pensado para poder llegar a medir hasta 3 paneles que se encuentren consecutivos. Las barras indicadas en la Imagen 52 con el número 2, pueden extenderse hasta una longitud de 3 m, lo que permite abarcar tres módulos con dimensiones de 2 x 1 m, que son los de mayor tamaño que hay en el mercado. Estas barras no pueden ser de más de 3m de longitud, ya que al encontrarse unidas únicamente por dos apoyos y soportar el peso de la estructura que incorpora la cámara, si fuesen de mayor longitud, las barras se deformarían, como se comentará más abajo.

Este prototipo a diferencia del anterior, ajusta la medida de sus barras a la longitud que presenten el conjunto de paneles que haya en un mismo string. De esta forma, se evita que a la hora de realizar la captura de los paneles haya algún elemento que obstaculice la imagen. Las dimensiones de este prototipo se pueden regular a lo ancho, largo y alto.

Para este prototipo, la cámara irá sobre un soporte que irá unido a la estructura mediante un conjunto de cuatro barras extensibles que de esta forma permitirán regular la distancia de la cámara a los paneles. El soporte de la cámara se puede ver representado en detalle en la siguiente imagen:

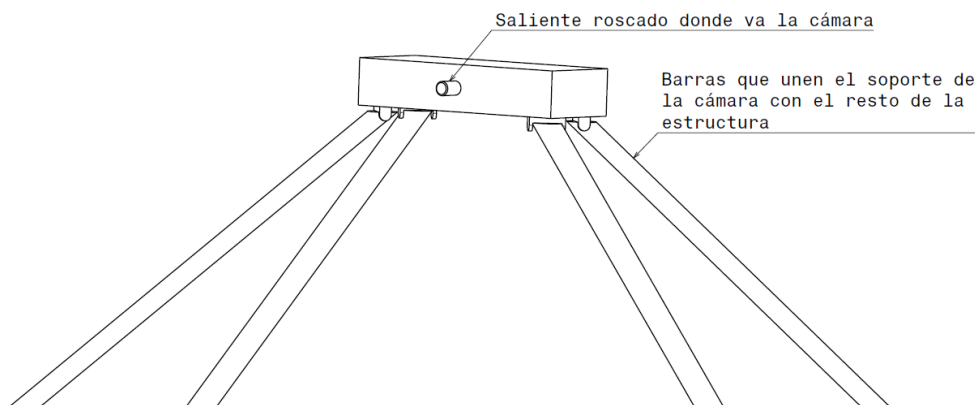


Imagen 53. Soporte de cámara en el tercer prototipo de medida de EL

Al igual que el anterior prototipo, presenta un saliente que va roscado, donde se coloca la cámara de tal forma que el objetivo de la misma quede paralelo a los paneles. La sujeción del soporte a las cuatro barras es fija, de tal forma que cuando se vaya a hacer el montaje del equipo, este elemento solo haya que regularlo para ajustarlo a las barras sobre las que irá apoyado. Su estructura se asemeja a la de un trípode.

En cuanto al transporte de la cámara a lo largo de los paneles, el procedimiento es parecido al del anterior prototipo. A través de las cuatro barras que sujetan el soporte de la cámara, irán unos cables atirantados que harán que se pueda desplazar a lo largo de toda la estructura. Este sistema está representado en verde en la imagen 52. Este sistema se puede ver más detalladamente en las siguientes imágenes:

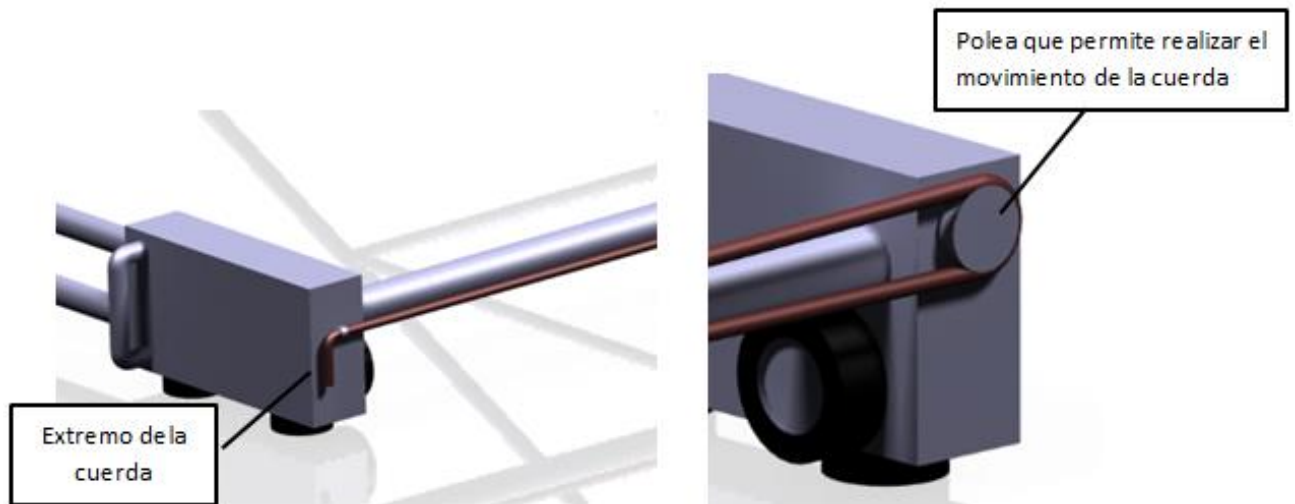


Imagen 54. Detalle sistema de desplazamiento del soporte de cámara en el tercer prototipo de medida de EL

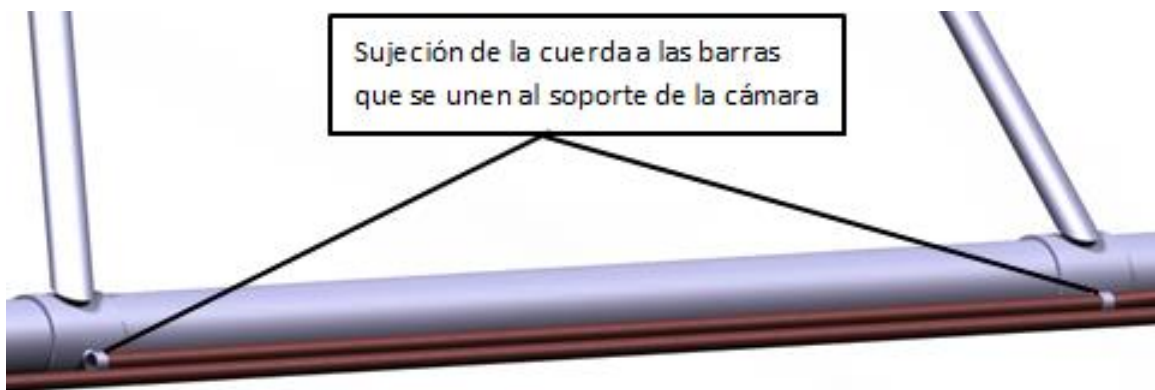


Imagen 55. Detalle sistema de desplazamiento del soporte de cámara en el tercer prototipo de medida de EL (2)

Para desplazar el soporte se debe tirar del extremo del cable que se encuentra libre, y de esta forma el soporte se desplazará hacia el otro extremo de la estructura.

En cuanto al apoyo de este equipo, es similar al anterior, pero en este caso cuenta con cuatro apoyos, los cuales presentan una serie de ruedas que permiten ir sobre los paneles. En la siguiente imagen se representa en detalle los apoyos de la estructura:

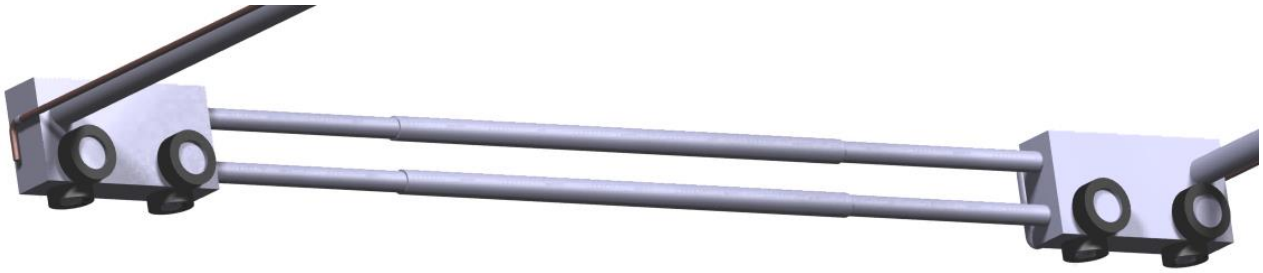


Imagen 56. Soporte del tercer prototipo

Las ruedas que van en vertical serán las que vayan desplazándose a lo largo de la superficie de los paneles. Las ruedas horizontales serán las que vayan por el lateral de la estructura de los módulos, sirviendo a su vez de agarre para que la estructura se mantenga sujeta.

La posición de estos apoyos en los paneles se representa en detalle en la siguiente imagen:

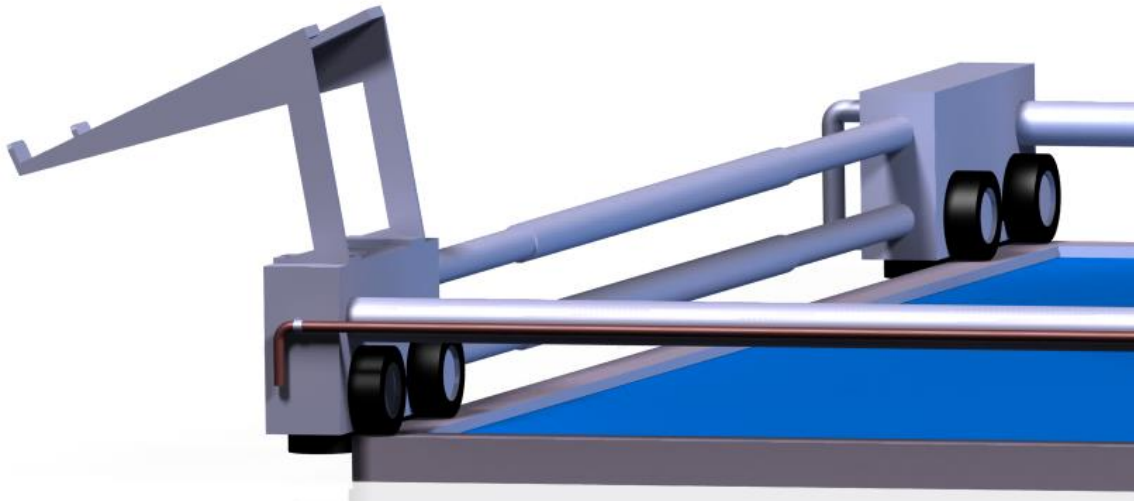


Imagen 57. Posición del soporte del tercer prototipo de medida sobre los paneles solares

Para el cableado en este caso, estos irán a lo largo de las barras que van desde el soporte de la cámara hasta el extremo de la estructura donde se encuentra posicionado el ordenador.

En la siguiente imagen se ve la representación de la estructura completa:

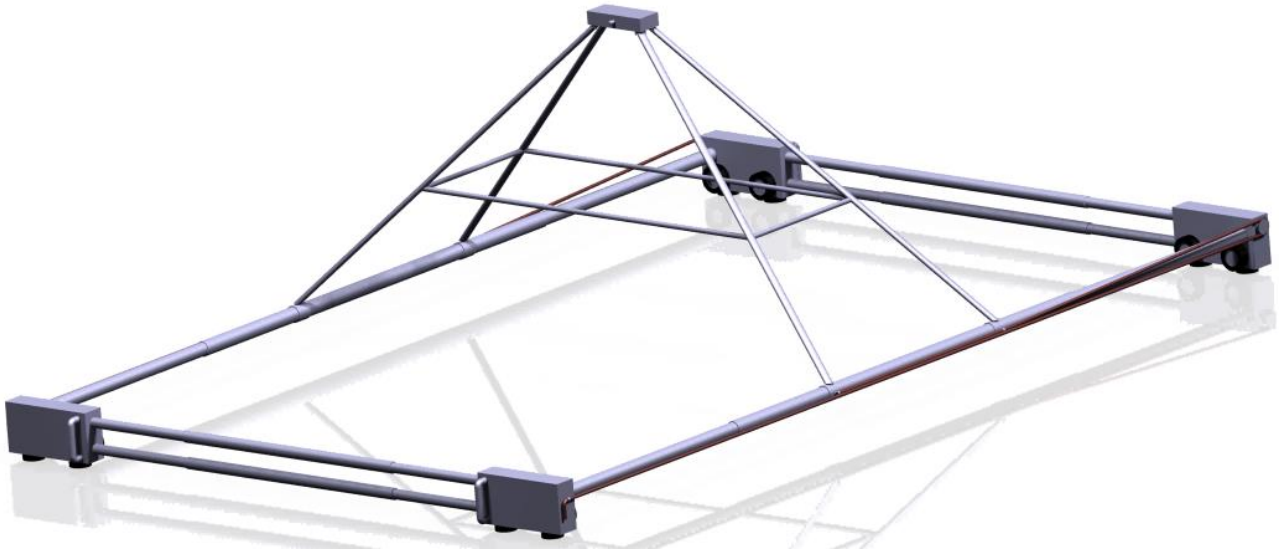


Imagen 58. Estructura completa del tercer prototipo de medida por EL

- **Proceso de medida**

Para la realización de medidas con este prototipo se debe proceder de la siguiente manera:

Como se trata de una estructura desmontable, lo primero que hay que hacer es unir todas las partes de la estructura regulándola a las dimensiones que presenten los paneles que haya que caracterizar. A su vez, habrá que regular la altura de la cámara, que dependerá del tamaño de los paneles y del objetivo de la cámara.

Una vez colocada la estructura sobre los paneles, se colocará el ordenador en su soporte y se conectará a la cámara de InGaAs para realizar las mediciones.

A partir de aquí lo único que habrá que hacer será deslizar la estructura a lo largo de los paneles ayudándose de los agarres que presenta y moviendo a su vez la cámara de posición para ir capturando las distintas hileras de paneles.

Este equipo también permite reducir el tiempo que se emplearía en realizar las mediciones, ya que el tiempo en trasladarse de unos paneles a otros sería menor que el empleado en el equipo actual.

- **Ventajas que presenta este prototipo**

- El empleo de este mecanismo nos permitirá realizar las mediciones de forma rápida.
- Obtendremos imágenes de electroluminiscencia sin deformaciones gracias a que el objetivo de la cámara se encuentra paralelo a los paneles.
- Nos permite realizar captura por electroluminiscencia de todos los paneles que se encuentren conformando strings
- Se trata de un equipo desmontable por lo que se podrá transportar de forma cómoda
- Presenta una plataforma de ordenador incorporada, por lo que ordenador y cámara van en el mismo equipo
- No es necesario enfocar la cámara cada vez que se desplaza a lo largo de los strings, ya que esta se encuentra siempre a la misma distancia de los paneles.

- **Estudio estructural**

Una vez establecido el diseño del prototipo, con todas las medidas de cada elemento, se procedió a realizar el estudio estructural para ver su resistencia ante efectos externos como la acción del viento o el propio peso de la estructura.

Para este estudio se tomó la estructura del diseño, eliminando algunos de sus componentes como el cable atirantado que une la sujeción de la cámara, cuyo efecto no es relevante en las deformaciones de la estructura.

Se le aplicó a la estructura una serie de fuerzas y presiones para los estados límite que puede llegar a soportar la estructura. Los esfuerzos a los que se puede ver sometida son los del propio peso de la estructura, el peso de la cámara, y la acción del viento.

El análisis estructural está realizado suponiendo que toda la estructura está hecha de acero. Como peso de la cámara se tomó 9.8 N. La acción del viento se estimará una velocidad máxima de 100 km/h, descartando trabajar, por su dificultad obvia, con mayores velocidades de viento.

En la siguiente imagen se pueden ver las deformaciones estructurales debidas al efecto del peso propio, sin haber ninguna carga más aplicada:

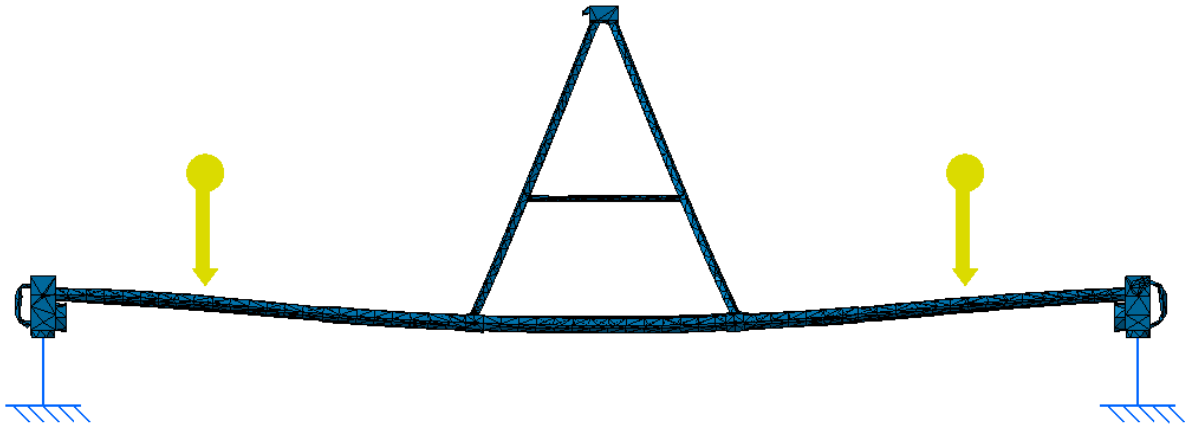


Imagen 59. Deformaciones estructurales debidas al peso propio de la estructura en el tercer prototipo

Como puede verse en esta primera imagen, las barras horizontales de mayor longitud presentan una deformación debida al peso de la estructura que soporta la cámara y al peso propio de la estructura. Esta deformación provoca que la distancia de la cámara a los paneles sea menor.

A continuación se muestra el efecto de aplicar los esfuerzos comentados previamente:

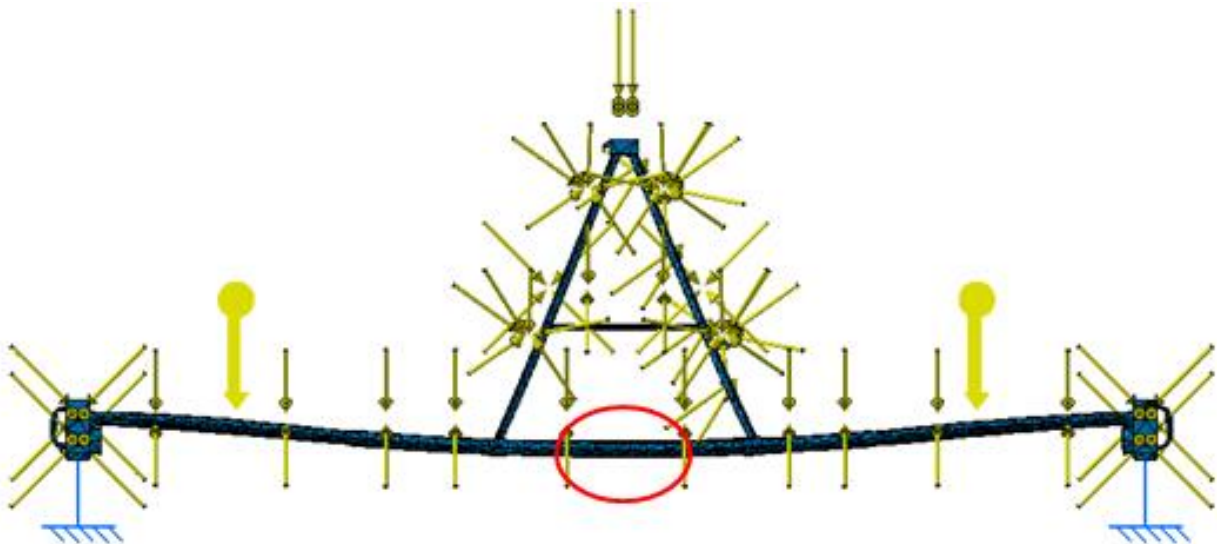


Imagen 60. Resultado de aplicar cargas a la estructura del tercer prototipo

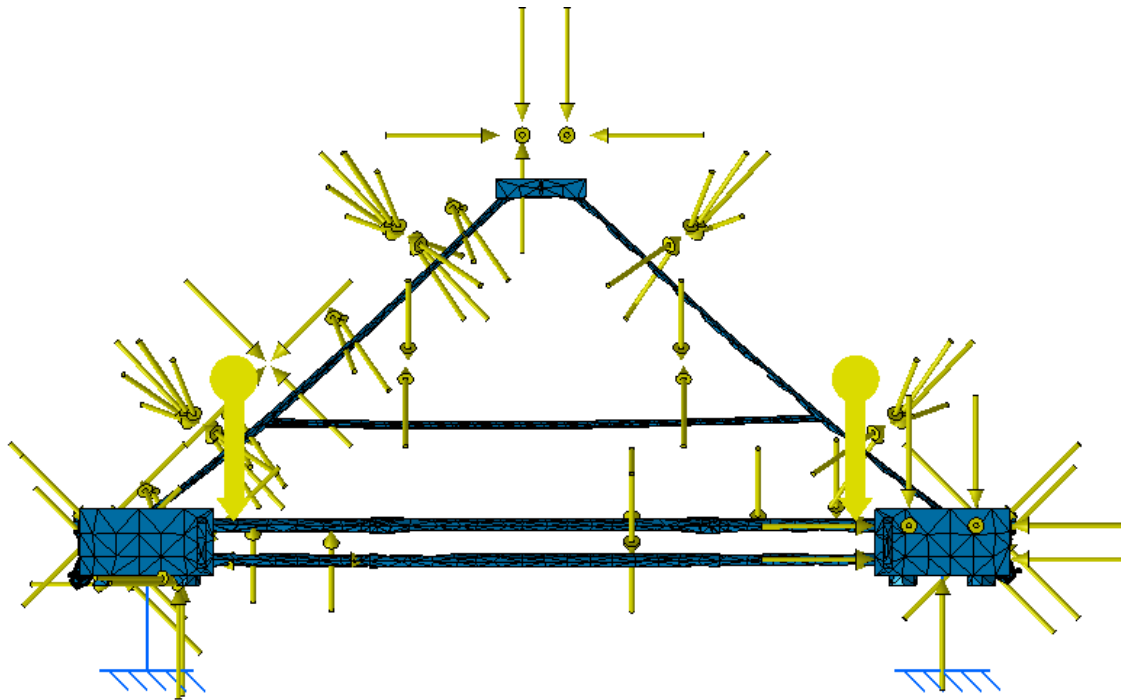


Imagen 61. Resultado de aplicar cargas externas a la estructura del tercer prototipo

Comparando la Imagen 59 con la 60, se puede comprobar que el efecto del peso de la cámara es mínimo. La deformación de la barra está causada en su mayoría por el peso de la estructura. Esto puede llegar a ser un problema a la hora de realizar las mediciones, ya que se pretende que la estructura no se vea afectada por ninguna deformación. Esa deformación hace que la posición de la cámara varíe, por lo que puede llegar a resultar que no se tomen medidas completas del panel.

La zona que presenta mayor deformación en la estructura es la señalada con un círculo rojo, cuyo desplazamiento es: -0.000101 ; -0.0101 ; -0.459 mm.

El resto de características estructurales van incluidas en el Anexo 4.

Cuarto prototipo

Una vez realizado el estudio estructural de los prototipos anteriores, se pudo observar que al estar ambos prototipos formados por barras extensibles, las zonas donde hay cambio de sección presentan concentración de tensiones. Por ello, con vistas a la fabricación de este equipo de medida, se añadieron una serie de condicionantes a los prototipos anteriores, para que de esta forma, el montaje de todo el equipo fuese más sencillo, a la vez que más económico. Se realizó un nuevo diseño, mezclando las principales ideas de

los prototipos anteriores y empleando elementos más standard y que fuesen fáciles de encontrar en el mercado.

Para mejorar los prototipos anteriores, se pensó en la utilización del mismo tipo de barras para toda la estructura, con mismos perfiles y dimensiones. Todos los elementos serían desmontables, permitiendo de esta forma adaptarse a las dimensiones que requiriesen los paneles.

A continuación se muestra el diseño de la estructura final:

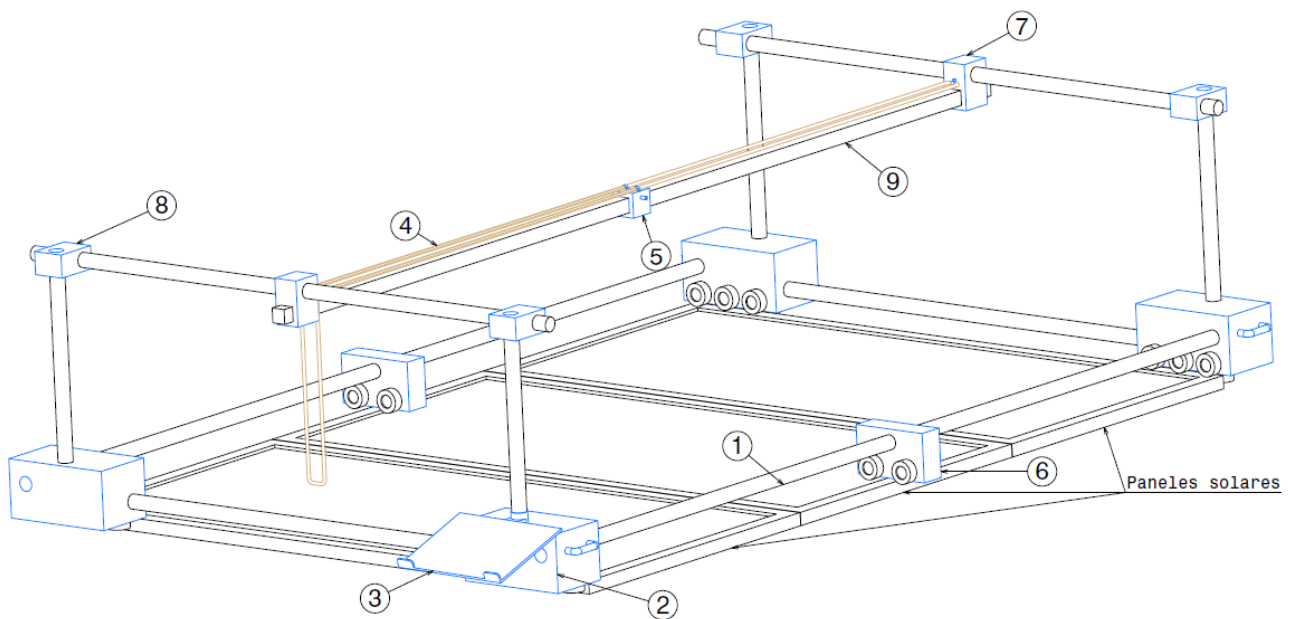


Imagen 62. Estructura del cuarto prototipo de medida por EL

Los elementos de los que está formada son:

1. Barra de un metro de largo, con un perfil tubular redondo de dimensiones $D_1=36$ mm y $D_2=40$ mm
2. Soporte estructura. Las dimensiones de este elemento son 350 x 200 x 140 mm
3. Soporte de ordenador
4. Cable atirantado, que une el soporte de la cámara con los extremos de la estructura
5. Soporte de la cámara
6. Soporte intermedio, cuyas dimensiones son 250 x 150 x 80 mm
7. Soporte barra intermedia
8. Soporte lateral de dimensiones 140 x 100 x 70 mm
9. Barra intermedia, de perfil cuadrado con medidas $L_1=30$ mm $L_2=32$ mm, con longitud de 150 mm

En cuanto a la unión de las barras, esta será mediante un empalme intermedio como el mostrado en las siguientes imágenes:

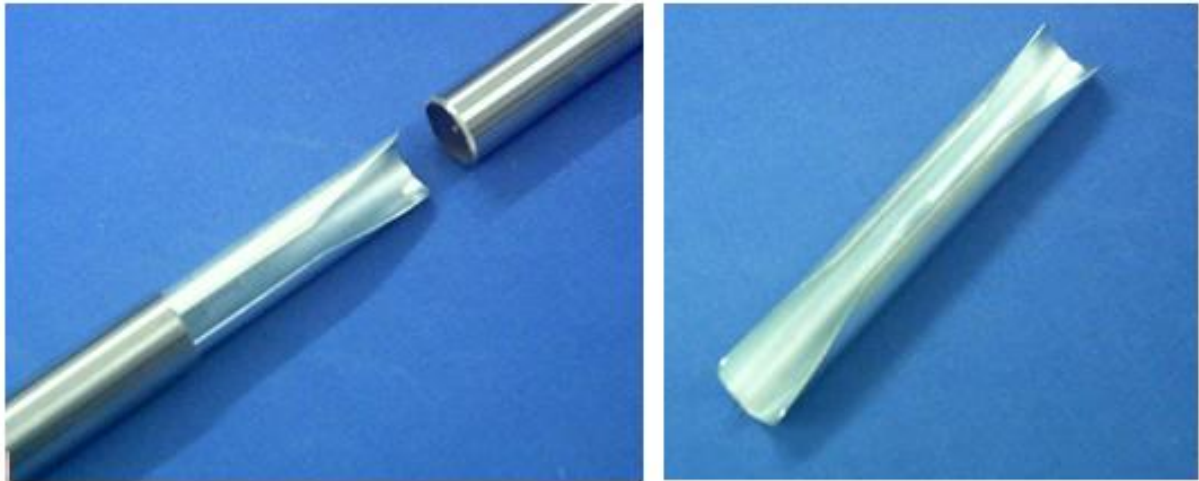


Imagen 63. Empalme intermedio barras perfiles tubulares redondos

Este empalme asegurará la unión entre barras, permitiendo con este método unir el número de barras necesario para realizar las mediciones para los distintos tipos de plantas.

Para el caso del perfil tubular cuadrado se empleará un empalme intermedio similar, el cual se puede ver en la siguiente imagen:



Imagen 64. Empalme intermedio barras perfiles tubulares cuadradas

Cada componente del equipo irá con un material determinado. Los cuerpos representados en color azul en la Imagen 62 serán de aluminio, mientras que los elementos representados en negro (a excepción de los módulos y las

ruedas de los soportes) serán de acero, ya que estos se ven sometidos a mayores esfuerzos.

El peso total que se estimó para esta estructura fue de 85kg.

Una de las ventajas de este prototipo es que puede abarcar tantos módulos como sea necesario, ya que lo único que se necesita es unir más barras y conseguir las dimensiones del equipo que se requiera.

Al presentar los apoyos intermedios, permite que la flexión de esas barras sea mínima, como se verá más adelante.

Este equipo, al poder emplear el número de barras que sea necesario, permite regularse tanto en altura, anchura y largo, a las dimensiones que se requiera. En este equipo la única limitación es la respuesta estructural en cuanto a deformación que puedan presentar las barras al abarcar distancias muy grandes.

En cuanto a la posición de la cámara en este equipo, también irá perpendicular a los paneles, con un soporte mucho más sencillo que el de los otros prototipos. Este elemento se detalla en la imagen siguiente:

Zona roscada donde
irá la cámara

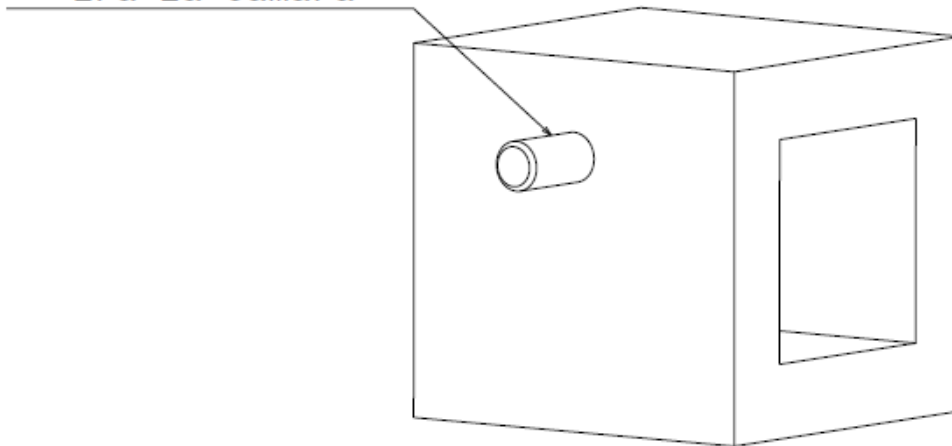


Imagen 65. Soporte de cámara en el cuarto prototipo

Al igual que en los otros prototipos, ese saliente va roscado con la misma métrica que el orificio de la cámara.

El sistema que mueve este soporte es igual que el de los otros anteriores. Un cable atirantado irá unido tanto a los extremos de la estructura como a ese soporte para permitir el movimiento del mismo. Este sistema se representa en color marrón en la imagen 62. Se puede ver más detalladamente en las siguientes imágenes:

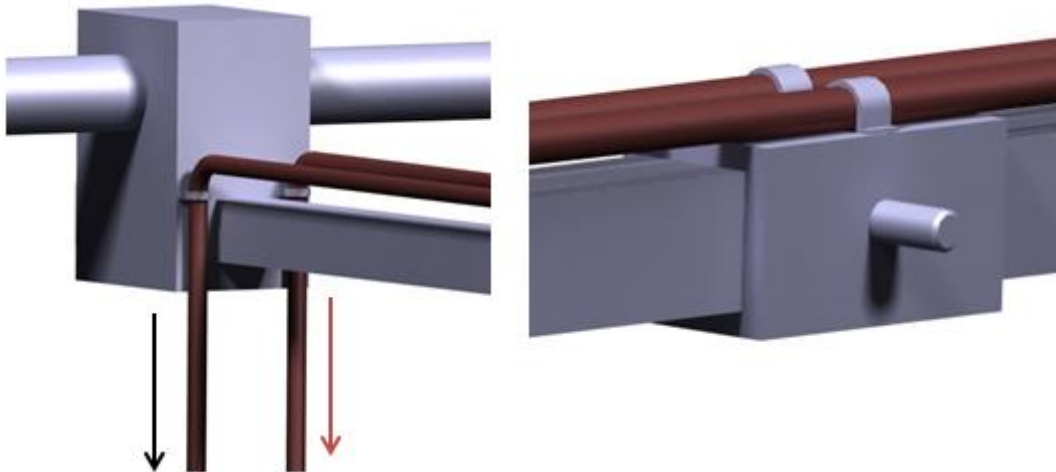


Imagen 66. Detalle sistema de movimiento del soporte de la cámara para el cuarto prototipo

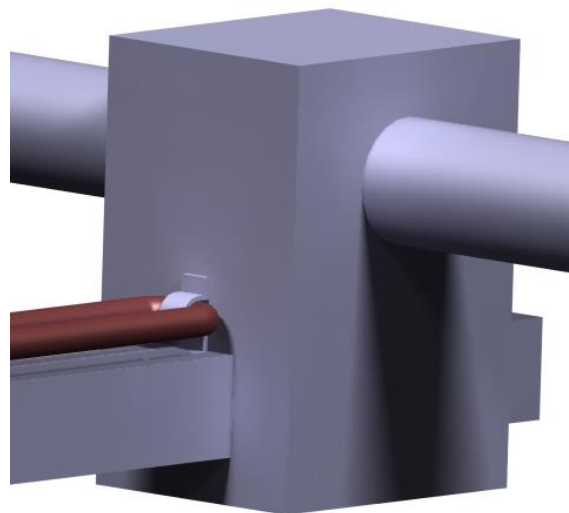


Imagen 67. Detalle del sistema de movimiento del soporte de la cámara en el cuarto prototipo

De esta forma, al tirar del cable, se conseguirá mover el soporte de la cámara a lo largo de toda la barra sobre la que va, en función del extremo de la barra del que se tire, indicado cada uno por una flecha de color rojo y negro en la Imagen 66.

El soporte de este prototipo es muy similar al del prototipo 3, este se muestra a continuación:

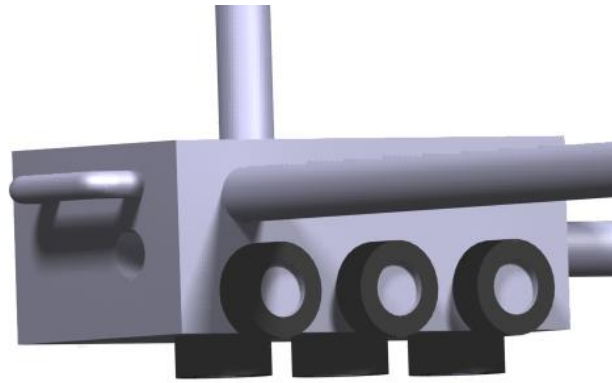


Imagen 68. Soporte estructura cuarto prototipo

Las ruedas van en la misma posición que en el prototipo 3. La función que cumplen a su vez es la misma.

Su colocación en los paneles se muestra en la siguiente imagen:

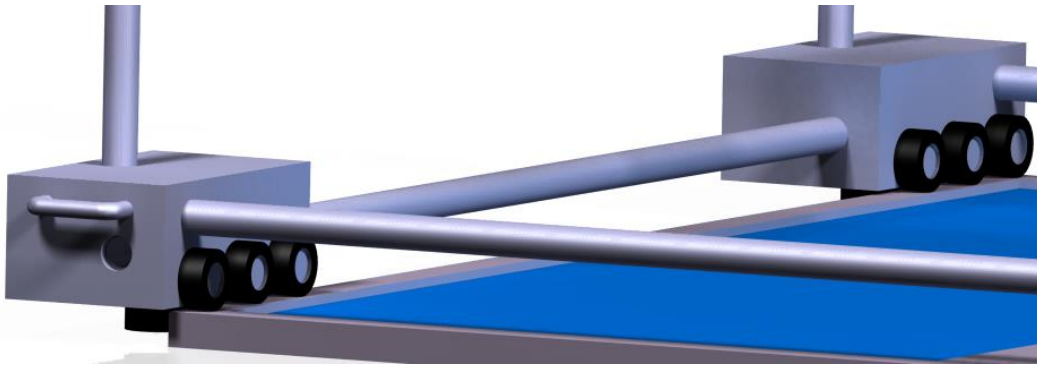


Imagen 69. Posición de las ruedas del cuarto prototipo respecto de los paneles solares

Al tratarse de un prototipo siendo una mezcla de los dos anteriores, el proceso de medida se basa en la misma idea que los anteriores.

- **Estudio estructural**

Una vez establecido el diseño del prototipo, con todas las medidas de cada elemento, se pasó a hacer un estudio estructural para ver su resistencia ante efectos externos como la acción del viento o el propio peso de la estructura.

Se tomó la estructura del diseño, eliminando algunos de sus componentes como el cable atirantado que une la sujeción de la cámara. Se le aplicó a la estructura las mismas cargas que en los anteriores prototipos.

Se realiza el análisis estructural suponiendo que toda la estructura está hecha de acero. Ante estos esfuerzos, el resultado es el siguiente:

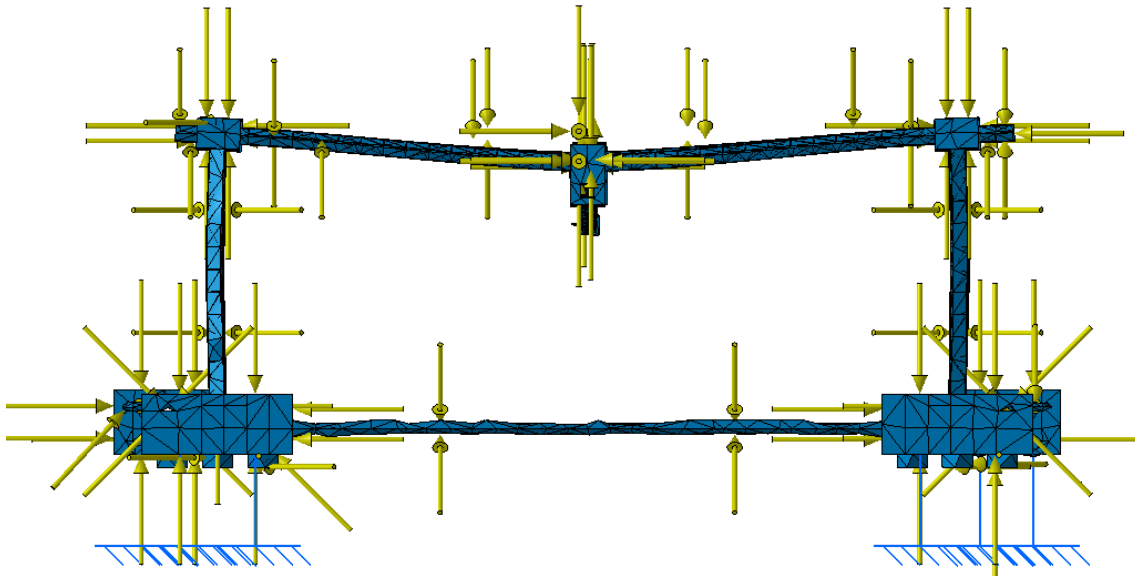


Imagen 70. Deformaciones estructura del cuarto prototipo ante la aplicación de cargas externas

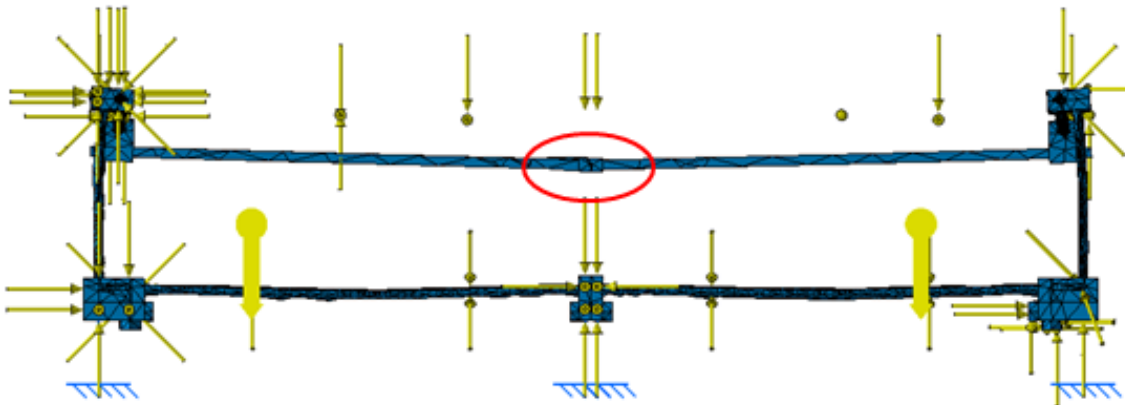


Imagen 71. Deformaciones estructura del cuarto prototipo ante la aplicación de cargas externas

Como se observa en las imágenes anteriores, las barras superiores presentan una cierta deformación, debida al peso propio de la estructura. Este análisis está realizado para la estructura compuesta completamente de acero, por lo que los resultados no son exactamente los mismos a los esperados con el diseño compuesto por elementos de acero y aluminio.

En estas imágenes se ve, que el empleo de esos apoyos intermedios permite que las barras que son de mayor longitud no se deformen.

La zona que presenta mayor deformación es la barra intermedia horizontal, señalada con un círculo rojo en la Imagen 71. El desplazamiento que presenta esta zona es de: -0.00067 ; $5.82e-0.05$; -0.0204 mm.

El resto de características estructurales van incluidas en el Anexo 5.

- **Ventajas de este prototipo**

Con este prototipo, la principal ventaja que podemos ver es que tiene mayor flexibilidad a la hora de poder adaptarse a las medidas que haya en las plantas solares.

Al ser todas las barras de igual perfil, esto reduce la concentración de tensiones en las zonas donde se producen cambios de perfil, por lo que las deformaciones también son menores en comparación con los otros prototipos.

A su vez, en este prototipo tampoco es necesario enfocar la cámara cada vez que se desplaza a lo largo de los strings, ya que esta se encuentra siempre a la misma distancia de los paneles.

El resultado obtenido con estos tres últimos prototipos es similar. A la hora de elegir entre uno u otro las características que harán diferenciarse unos de otros serán el peso total de la estructura, el movimiento de la cámara a lo largo de la estructura y la deformación que presente cada uno ante agentes externos.

El equipo completo de medida para los tres diseños expuestos hasta ahora se puede visualizar en las imágenes siguientes:

- **Segundo prototipo**

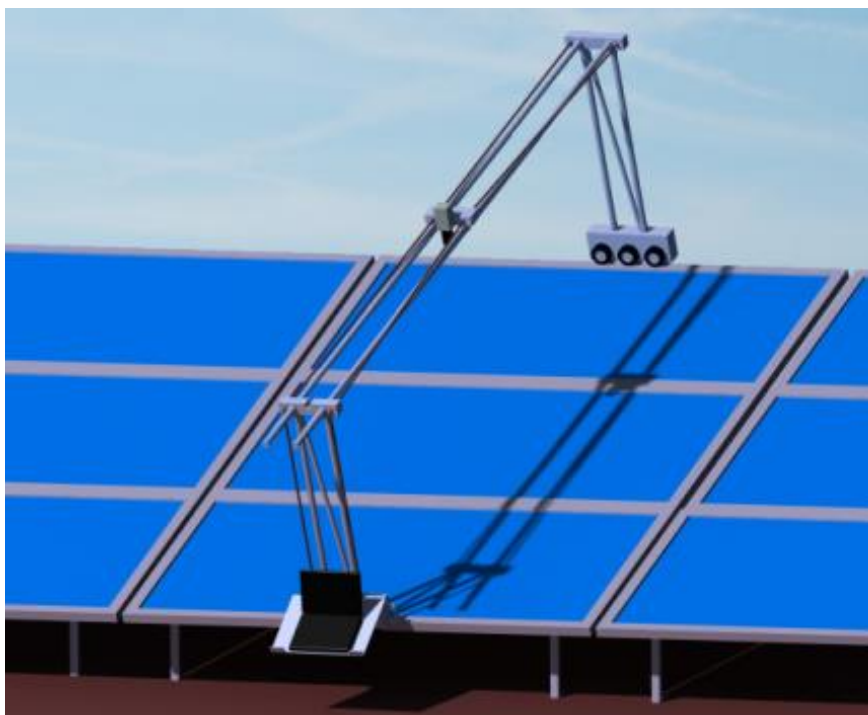


Imagen 72. Equipo completo de medida segundo prototipo

✚ Tercer prototipo

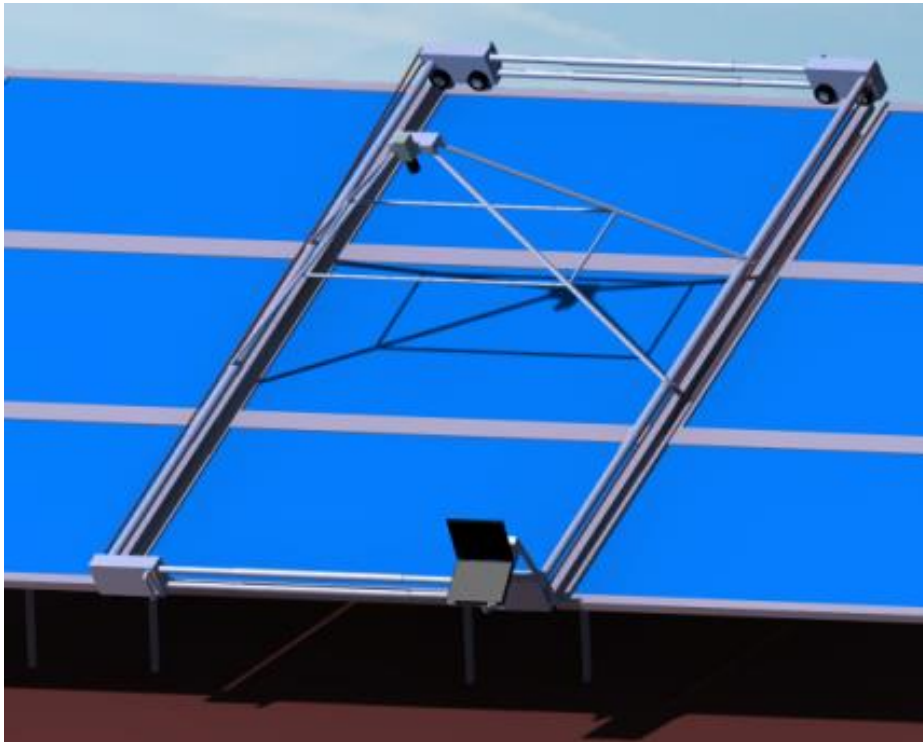


Imagen 73. Equipo completo de medida tercer prototipo

✚ Cuarto prototipo

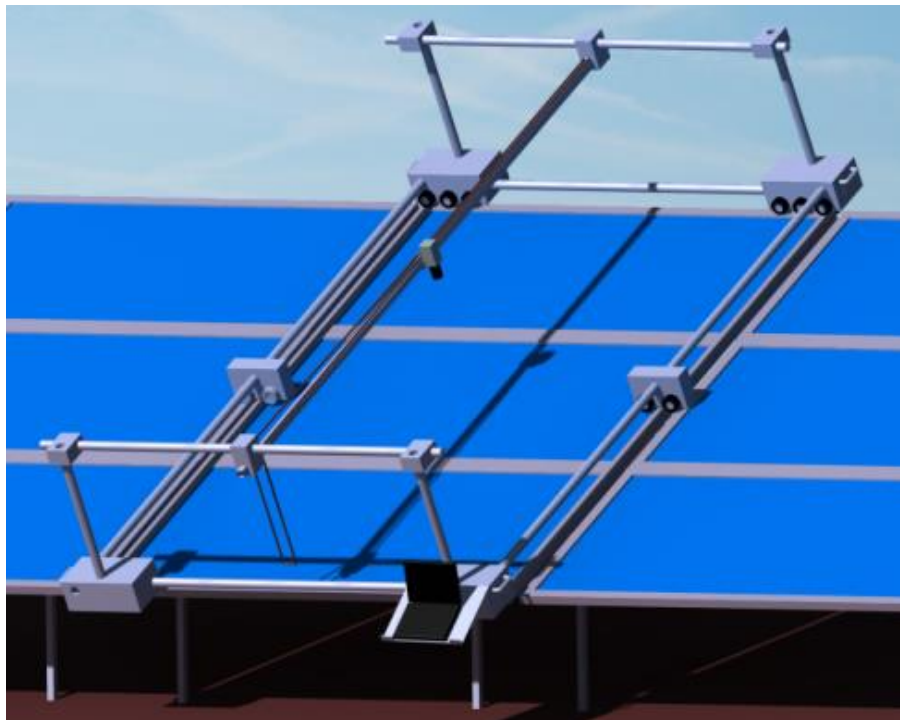


Imagen 74. Equipo completo de medida cuarto prototipo



CAPÍTULO 6. Conclusiones y trabajos futuros

Uno de los objetivos de este trabajo ha sido determinar que métodos y equipos son los más convenientes a la hora de realizar caracterización de células solares para determinar el estado de sus superficies. Tras analizar los distintos métodos de caracterización de células y los equipos más recomendados para ello, se concluyó lo siguiente:

- Una de las técnicas más conveniente para la realización de este tipo de caracterización de células solares, para observar los posibles defectos que puedan presentar, es la electroluminiscencia.
- Para caracterizar células solares por electroluminiscencia al aire libre durante las horas diurnas, el sensor que arroja mejores resultados es el CCD de InGaAs.

Por otro lado, el principal objetivo de este trabajo, ha sido realizar el diseño de un equipo que permitiese mejorar las labores de medida por electroluminiscencia de células solares en plantas fotovoltaicas. Con esto, se pretendía conseguir un equipo de medida rápido y que pudiese arrojar buenos resultados e imágenes sin deformaciones y de buena resolución. Después de realizar varios diseños de estructuras con diferentes características, se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- El empleo de una estructura que vaya sobre los paneles solares, permite realizar capturas de electroluminiscencia de forma rápida y con mínimas deformaciones de imagen.
- La distancia del sensor CCD de InGaAs será función de la distancia focal del objetivo y del tamaño del panel solar a caracterizar.
- El peso total de equipo de medida se verá influenciado por los materiales empleados y por los perfiles que conformarán las barras del prototipo. Este peso deberá ser lo suficientemente ligero para permitir ser trasladado por un máximo de dos personas.
- Para dotar a la estructura de mayor rigidez, se deberán emplear barras no demasiado largas y con perfiles de mismas dimensiones para que no haya concentración de tensiones en las uniones y las deformaciones sean mínimas.
- El aunar en un mismo equipo la cámara CCD de InGaAs y el ordenador, permite realizar mediciones más rápidas, ya que a la vez que se traslada la cámara por lo paneles, se desplaza también el ordenador.



- El realizar la estructura con elementos desmontables, permite que sea fácil de trasladar a plantas fotovoltaicas.

Con todo ello, cabe concluir que a la hora de realizar caracterización de células fotovoltaicas mediante electroluminiscencia, esta se ve influida por una serie de factores que habrá que controlar antes y durante los procesos de medida, para obtener de esta forma resultados fiables y con los que se puedan determinar el estado de las células solares.

Trabajos futuros

Los prototipos expuestos a lo largo de este trabajo, presentan sistemas manuales para los movimientos tanto del equipo completo a lo largo de los paneles, como de la cámara a lo largo de la estructura. Como trabajo futuro se propone la automatización de estos movimientos, introduciendo sistemas motorizados que puedan realizar estos movimientos de forma que se facilite todo el proceso de medida.

Otro trabajo futuro sería el estudio tanto a nivel estructural como económico de realizar estas estructuras con materiales que fuesen más ligeros y resistentes, como carbono reforzado con fibra de carbono, y ver la comparativa con las estructuras expuestas en este trabajo.



CAPÍTULO 7. Bibliografía

- [1] **Moralejo Ochoa, B.** *Desarrollo y optimización de sistemas de corrientes inducidas ópticamente y de imágenes de luminiscencia para la caracterización de células fotovoltaicas*. S.I.: Universidad de Valladolid, 2015
- [2] Tipos de paneles fotovoltaicos (2014). Recuperado el 15 de Abril de 2017 de: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>
- [3] **Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica** (2014). Recuperado el 23 de Mayo de 2017 de: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- [4] **Martil, I.** (2015). La energía solar fotovoltaica en la vanguardia frente al cambio climático. Recuperado el 15 de Abril de 2017 de: <http://blogs.publico.es/ignacio-martil/2015/11/30/la-energia-solar-fotovoltaica-en-la-vanguardia-frente-al-cambio-climatico/>
- [5] **Moretón Fernández, A.** *Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio*. S.I.: Universidad de Valladolid, 2016
- [6] **Redondo Hernando, D.** *Desarrollo de un sistema de caracterización de obleas y células solares de Silicio multicristalino mediante la adquisición de imágenes de fotoluminiscencia usando un detector de InGaAs*. S.I.: Universidad de Valladolid, 2017
- [7] **Pozo Molina, A.** *Caracterización óptica de dispositivos CCD y aplicaciones*. 2008
- [8] **M. Köntges.** *Quantitative analysis of PV- modules by electroluminescence images for quality control*. S.I.: Institut für Solarenergieforschung Hameln, 2009
- [9] **K. Agroui.** *Indoor and Outdoor Characterizations of Photovoltaic Module Based on Mulicrystalline Solar Cells*. Elsevier Ltd. 2012
- [10] Conexión paneles solares: en paralelo, en serie, conexión en serie y en paralelo. (2016). Recuperado el 23 de Mayo de 2017 de: https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/conexion-paneles-solares-en-serie-en-paralelo_1

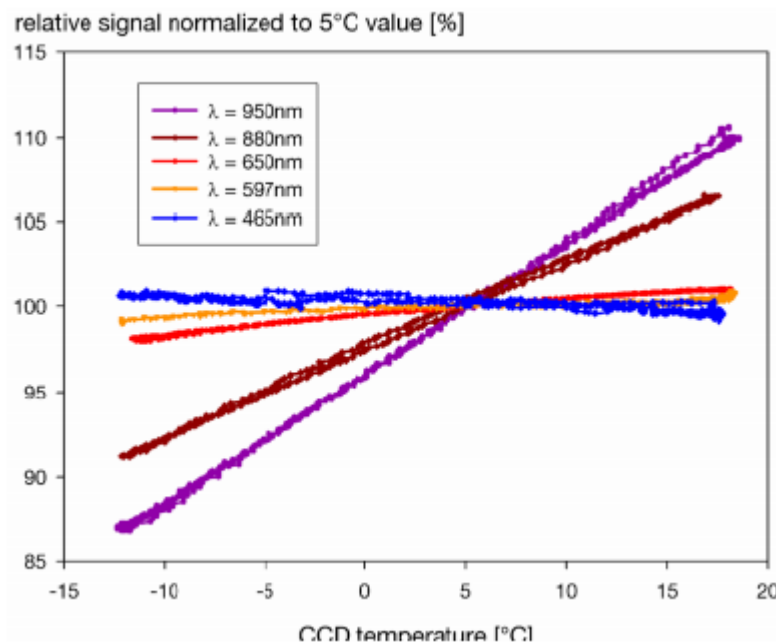


[11] **Bernd Doll.** *Non-stationary outdoor EL-measurements with a fast and highly sensitive InGaAs camera.* Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung. 2011

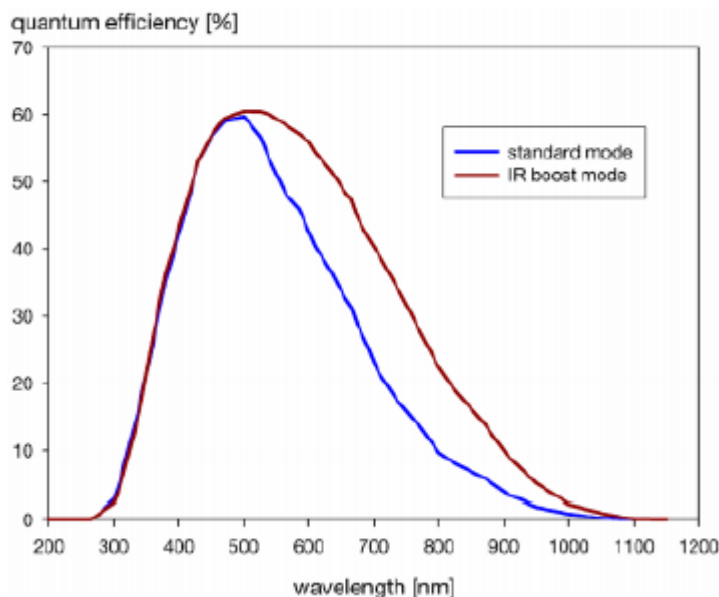
CAPÍTULO 8. Anexos

Anexo 1. Cámara pco. 1300 solar.

	unit	setpoint	pco.1300 solar
resolution (hor x ver) ¹	pixel	@ normal mode @ extended mode	1392 x 1040 1424 x 1060
pixel size (hor x ver)	μm ²		6.45 x 6.45
sensor format / diagonal	inch / mm		2/3" / 11.14
quantum efficiency	%	@ 880nm typical @ +15 °C	13
full well capacity	e ⁻		16 000
dark current	e ⁻ /pixel-s	@ 10 °C typical @ standard mode	0.05
image sensor			ICX285AL
maximum dynamic range	dB	CCD + camera @ 10 MHz	68.5
dynamic range A/D ²	bit		12
readout noise	e ⁻ rms	@ 10 / 20 MHz	6 / 10
imaging frequency, frame rate	fps	@ full frame @ 10 / 20 MHz	5.9 / 11.7
pixel scan rate	MHz		10 / 20
A/D conversion factor	e ⁻ / count	standard / IR boost	3.8 / 1.9
spectral range	nm		290 .. 1200
exposure time	s	@ standard mode @ IR boost mode	5 μs .. 1 h 100 ms .. 1 h



quantum efficiency



	unit	setpoint	pco.1300 solar
anti-blooming factor		@ stand.light mode / @ IR boost mode @ 100 ms expos. time	> 400 / > 4
smear	%		< 0.002
binning (hor x ver)	pixel		1 x 1, 1 x 2, 2 x 1, 2 x 2
optical input			c-mount
trigger, auxiliary signals		internal / external	software / TTL level
power supply	VDC	typical	18..28 V 24 V
cooling method			1 stage Peltier cooler with forced air cooling
cooled CCD temperature	°C	versus ambient temperature	-25
power consumption	W	max.	20
mechanical dimensions (w x h x l)	mm ³		113 x 104 x 110
weight	kg		1.1
ambient temperature	°C	range	+10 .. +40
operating humidity	%	range	10 .. 80
storage temperature	°C	range	-20 .. +70
data interface			IEEE 1394a

Anexo 2. Cámara InGaAs Hamamatsu photonics.

(1) Electric specifications

Item	for USB 3.0	for EIA RS-170A
Imaging device	Two dimensions InGaAs sensor	
Effective number of pixels	640 (H) × 512 (V)	
Cell size	20 μm × 20 μm	
Light receiving surface	12.8 mm × 10.24 mm	
Sensitivity wavelength	950 nm to 1700 nm	
Sensor mode	Rolling shutter	
Cooling temperature (forced air-cooling)	10 ± 0.5 °C (ambient temperature: 25 °C)	
Output interface	USB 3.0 (no warranty for USB2.0)	EIA RS-170A
Frame rate	59.774 Hz (exposure time: 16.7 ms)	—
Horizontal scanning frequency	—	15.734 kHz
Vertical scanning frequency	—	59.94 Hz
A/D converter	14 bit	—
Dark offset (target)	300 counts	—
Exposure time	16.7 ms to 1 s (100 μs step)	
External trigger function	Edge trigger, Level trigger, Start trigger	
Input connector of external control	SMA connector Route 1	
Signal level of external control	3.3 V LVCMOS level	
External trigger delay function	0 s to 10 s (10 μs step)	
Image processing functions	Correction of background, Correction of shading	
Temperature protection	Equipped	
FAN	Equipped	
Lens mount	C-mount	

(2) Power supply specification

Input power supply	DC +12 V (Input range: +11.4 V to +13.5 V)
Power consumption	16 W (max.)

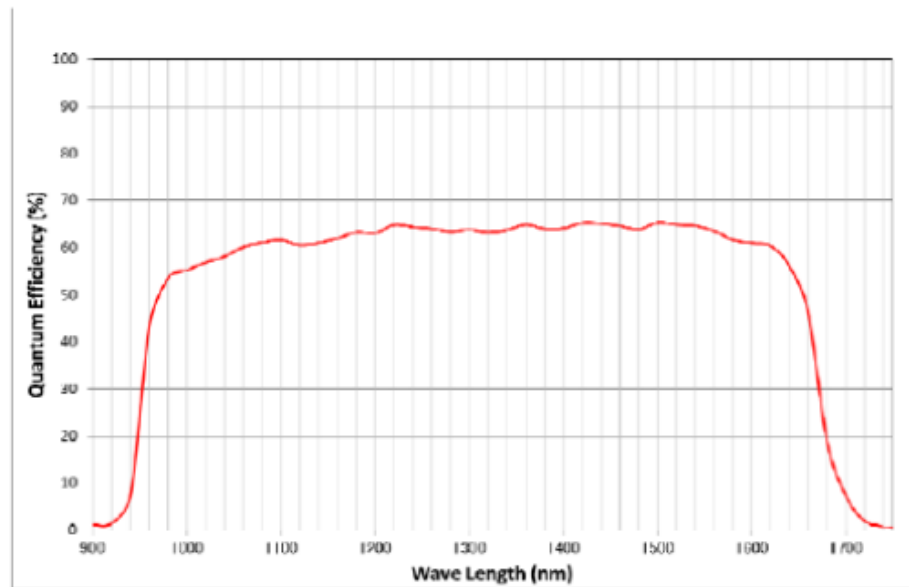
(3) Operating environment

Recommended ambient operating temperature	+25 °C ± 3 °C
Ambient operating temperature	0 °C to +40 °C
Ambient storage temperature	-10 °C to +50 °C
Ambient operating humidity	30 % to 80 %, no condensation
Ambient storage humidity	90 % or less, no condensation
Operating/storage place	Indoor, altitude up to 2000 m
Ambient conditions	No corrosive gas, dust nor vibration

(4) Dimensional outline and weight

Dimensional outline	56 mm (W) × 56 mm (H) × 98 mm (D) (export for projection parts)
Weight	Approx. 520 g

This is the typical spectral response.



Anexo 3. Estudio estructural prototipo 2.

Analysis1

MESH:

Entity	Size
Nodes	2409
Elements	6828

ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
TE4	6828 (100,00%)

ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	1652 (24,19%)	4382 (64,18%)	794 (11,63%)	0,020	0,187
Aspect Ratio	1043 (15,28%)	1679 (24,59%)	4106 (60,13%)	29,588	10,423

Materials.1

Material	Steel
Young's modulus	2e+011N_m2
Poisson's ratio	0,266
Density	7860kg_m3
Coefficient of thermal expansion	1,17e-005_Kdeg
Yield strength	2,5e+008N_m2

Static Case

Boundary Conditions

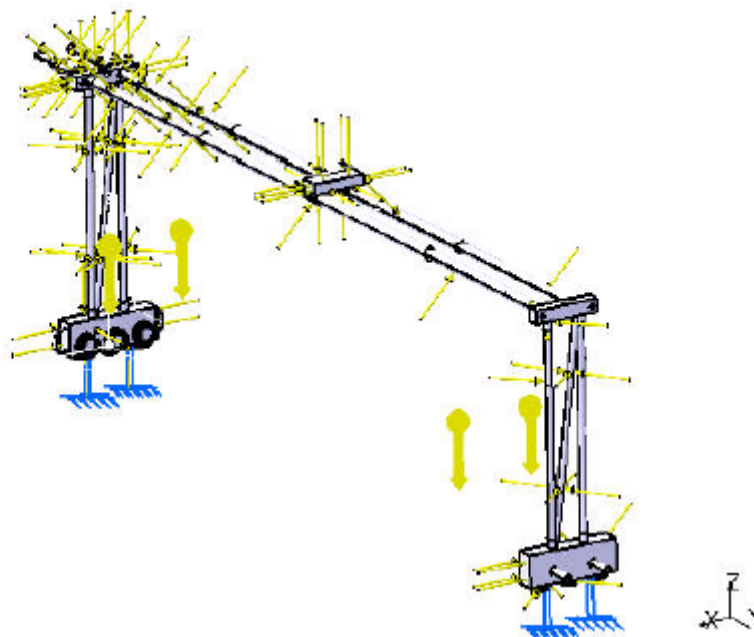


Figure 1

STRUCTURE Computation

Number of nodes	:	2409
Number of elements	:	6828
Number of D.O.F.	:	7227
Number of Contact relations	:	0
Number of Kinematic relations	:	0

Linear tetrahedron : 6828

RESTRAINT Computation

Name: Restraints.1

Number of S.P.C : 189

LOAD Computation

Name: Loads.1

Applied load resultant :

Fx = 2 . 656e-002 N



Fy = 4 . 700e-001 N
 Fz = -8 . 564e+002 N
 Mx = -1 . 307e+003 Nxm
 My = -6 . 671e-003 Nxm
 Mz = -8 . 738e-002 Nxm

STRUCTURAL MASS Computation

Name: StructuralMassSet.1

Number of lines : 7227
 Number of coefficients : 119340
 Number of blocks : 1
 Maximum number of coefficients per bloc : 119340
 Total matrix size : 1 . 39 Mb

Structural mass : 8.636e+001 kg

Inertia center coordinates

Xg : 3 . 175e-003 mm
 Yg : 1 . 527e+003 mm
 Zg : 3 . 604e+002 mm

Inertia tensor at origin: kgxm2

4.039e+002	7.831e-004	8.943e-003
7.831e-004	2.766e+001	-4.688e+001
8.943e-003	-4.688e+001	3.776e+002

STIFFNESS Computation

Number of lines : 7227
 Number of coefficients : 119340
 Number of blocks : 1
 Maximum number of coefficients per bloc : 119340
 Total matrix size : 1 . 39 Mb

SINGULARITY Computation

Restraint: Restraints.1

Number of local singularities : 0



Number of singularities in translation : 0
 Number of singularities in rotation : 0
 Generated constraint type : MPC

CONSTRAINT Computation

Restraint: Restraints.1

Number of constraints : 189
 Number of coefficients : 0
 Number of factorized constraints : 189
 Number of coefficients : 0
 Number of deferred constraints : 0

FACTORIZED Computation

Method : SPARSE
 Number of factorized degrees : 7038
 Number of supernodes : 762
 Number of overhead indices : 24543
 Number of coefficients : 287460
 Maximum front width : 96
 Maximum front size : 4656
 Size of the factorized matrix (Mb) : 2 . 19315
 Number of blocks : 1
 Number of Mflops for factorization : 1 . 474e+001
 Number of Mflops for solve : 1 . 185e+000
 Minimum relative pivot : 1 . 630e-005

Minimum and maximum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
7.5667e+005	Tx	2409	1.0051e+001	3.0800e+003	4.5279e+002
3.2959e+011	Tz	753	-8.5000e+001	3.1201e+002	9.7500e+002

Minimum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
8.3168e+005	Tz	2409	1.0051e+001	3.0800e+003	4.5279e+002
2.2849e+006	Ty	389	-1.4000e+002	3.0050e+003	3.5000e+001
2.3220e+006	Ty	2409	1.0051e+001	3.0800e+003	4.5279e+002
3.1097e+006	Ty	1586	-5.6757e+001	1.5478e+003	9.9322e+002
3.7182e+006	Tz	1169	0.0000e+000	3.0700e+003	4.5200e+002
3.9267e+006	Tx	2327	8.0000e+001	3.1509e+003	3.0000e+001



3.9910e+006	Tz	2327	8.0000e+001	3.1509e+003	3.0000e+001
4.1206e+006	Ty	1168	6.4239e+000	3.0700e+003	3.9868e+002
4.1958e+006	Tx	2023	7.2868e+001	6.1726e+000	6.1977e+002

Translational pivot distribution

Value	Percentage
10.E5 --> 10.E6	2.8417e-002
10.E6 --> 10.E7	1.9892e-001
10.E7 --> 10.E8	4.1205e-001
10.E8 --> 10.E9	4.8025e+000
10.E9 --> 10.E10	4.3677e+001
10.E10 --> 10.E11	4.0878e+001
10.E11 --> 10.E12	1.0003e+001

DIRECT METHOD Computation

Name: Static Case Solution.1

Restraint: Restraints.1

Structural mass is taken into account

Load: Loads.1

Strain Energy : 8.711e-003 J

Equilibrium

Components	Applied Forces	Reactions	Residual	Relative Magnitude Error
Fx (N)	2.6556e-002	-2.6556e-002	-1.2052e-008	1.2976e-010
Fy (N)	4.6998e-001	-4.6998e-001	5.2270e-010	5.6279e-012
Fz (N)	-8.5643e+002	8.5643e+002	-1.0450e-007	1.1252e-009
Mx (Nxm)	-1.3073e+003	1.3073e+003	-2.3327e-	7.8488e-

			007	010
My (Nxm)	-6.6712e-003	6.6712e-003	-6.0919e-009	2.0497e-011
Mz (Nxm)	-8.7376e-002	8.7376e-002	9.7645e-009	3.2854e-011

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.2

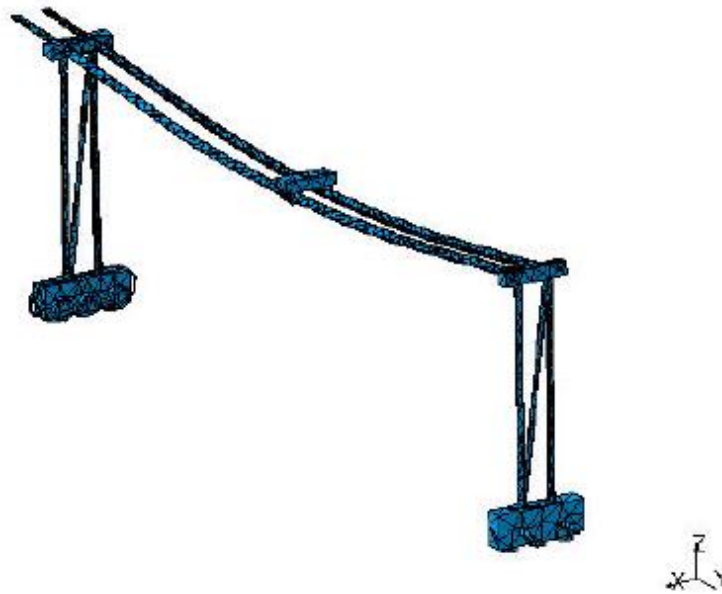


Figure 2

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Von Mises stress (nodal values).2

Von Mises stress (nodal values).2



On Boundary

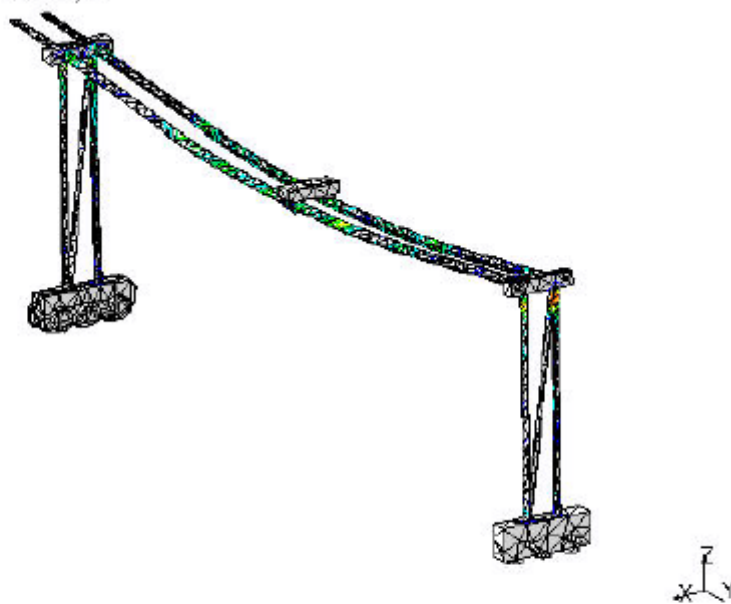


Figure 3

3D elements: : Components: : All

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.1

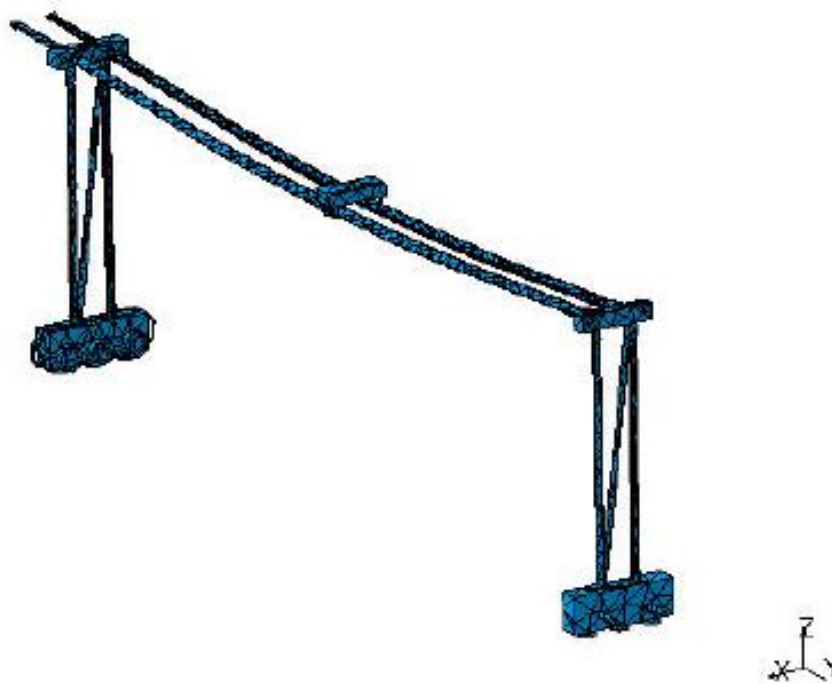


Figure 4



On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Global Sensors

Sensor Name	Sensor Value
Energy	0,009J
Global Error Rate (%)	66,983428955

Anexo 4. Estudio estructural prototipo 3.

Anexo 4

MESH:

Entity	Size
Nodes	4577
Elements	12596

ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
TE4	12596 (100,00%)

ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	2617 (20,78%)	9212 (73,13%)	767 (6,09%)	0,009	0,184
Aspect Ratio	1655 (13,14%)	3019 (23,97%)	7922 (62,89%)	34,349	9,501

Materials.1

Material	Steel
Young's modulus	2e+011N_m2
Poisson's ratio	0,266
Density	7860kg_m3
Coefficient of thermal expansion	1,17e-005_Kdeg
Yield strength	2,5e+008N_m2

Static Case

Boundary Conditions

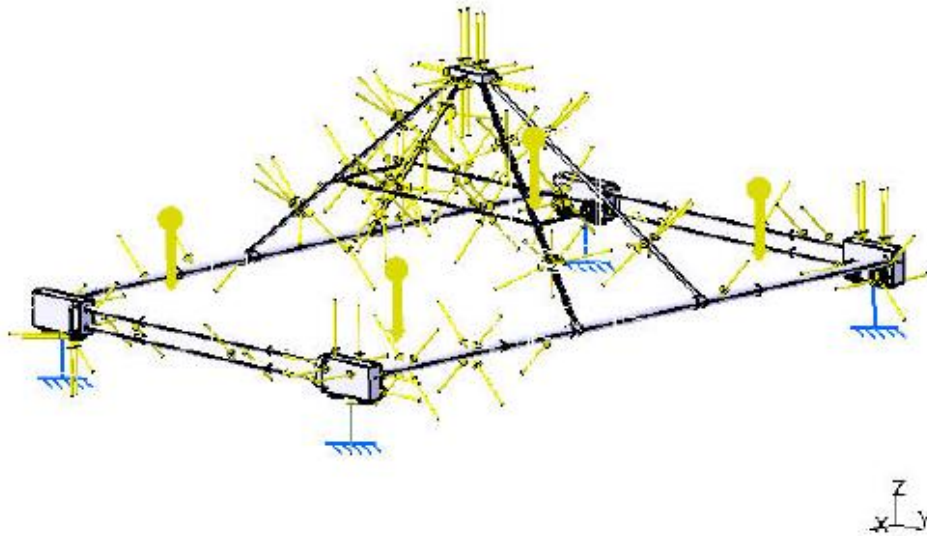


Figure 1

STRUCTURE Computation

Number of nodes	:	4577
Number of elements	:	12596
Number of D.O.F.	:	13731
Number of Contact relations	:	0
Number of Kinematic relations	:	0

Linear tetrahedron : 12596

RESTRAINT Computation

Name: Restraints.1

Number of S.P.C : 324

LOAD Computation

Name: Loads.1

Applied load resultant :

Fx = -2 . 623e-001 N



Fy = -5 . 317e-003 N
 Fz = -1 . 485e+003 N
 Mx = 2 . 717e+000 Nxm
 My = -2 . 236e+003 Nxm
 Mz = 2 . 198e-001 Nxm

STRUCTURAL MASS Computation

Name: StructuralMassSet.1

Number of lines : 13731
 Number of coefficients : 223617
 Number of blocks : 1
 Maximum number of coefficients per bloc : 223617
 Total matrix size : 2 . 61 Mb

Structural mass : 1.505e+002 kg

Inertia center coordinates

Xg : -1 . 506e+003 mm
 Yg : -1 . 959e+000 mm
 Zg : 5 . 379e+001 mm

Inertia tensor at origin: kgxm2

1.120e+002	-7.881e-001	1.250e+001
-7.881e-001	6.512e+002	4.143e-003
1.250e+001	4.143e-003	7.500e+002

STIFFNESS Computation

Number of lines : 13731
 Number of coefficients : 223617
 Number of blocks : 1
 Maximum number of coefficients per bloc : 223617
 Total matrix size : 2 . 61 Mb

SINGULARITY Computation

Restraint: Restraints.1

Number of local singularities : 0



Number of singularities in translation : 0
 Number of singularities in rotation : 0
 Generated constraint type : MPC

CONSTRAINT Computation

Restraint: Restraints.1

Number of constraints : 324
 Number of coefficients : 0
 Number of factorized constraints : 324
 Number of coefficients : 0
 Number of deferred constraints : 0

FACTORIZED Computation

Method : SPARSE
 Number of factorized degrees : 13407
 Number of supernodes : 1151
 Number of overhead indices : 44562
 Number of coefficients : 670938
 Maximum front width : 132
 Maximum front size : 8778
 Size of the factorized matrix (Mb) : 5 . 11885
 Number of blocks : 1
 Number of Mflops for factorization : 4 . 232e+001
 Number of Mflops for solve : 2 . 751e+000
 Minimum relative pivot : 2 . 475e-005

Minimum and maximum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
7.5115e+005	Tz	4577	2.7638e+001	-6.3403e+002	5.2069e+001
2.9018e+011	Tz	888	3.1000e+001	1.0521e+003	1.8480e+001

Minimum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
8.2865e+005	Tz	4427	3.8682e+001	4.0652e+002	2.7055e+001
1.1671e+006	Ty	4577	2.7638e+001	-6.3403e+002	5.2069e+001
1.3655e+006	Ty	4427	3.8682e+001	4.0652e+002	2.7055e+001
1.9897e+006	Tz	4423	3.7484e+001	3.8021e+002	5.6323e+001
2.1613e+006	Tx	4423	3.7484e+001	3.8021e+002	5.6323e+001
2.9327e+006	Tz	4425	5.0403e+001	3.7431e+002	4.7306e+001



4.3811e+006	Ty	4425	5.0403e+001	3.7431e+002	4.7306e+001
4.9075e+006	Tz	3575	-1.6516e+003	-1.0060e+003	5.9308e+000
5.1980e+006	Tx	3575	-1.6516e+003	-1.0060e+003	5.9308e+000

Translational pivot distribution

Value	Percentage
10.E5 --> 10.E6	1.4918e-002
10.E6 --> 10.E7	1.6409e-001
10.E7 --> 10.E8	4.9974e-001
10.E8 --> 10.E9	6.0342e+000
10.E9 --> 10.E10	4.4686e+001
10.E10 --> 10.E11	4.5357e+001
10.E11 --> 10.E12	3.2446e+000

DIRECT METHOD Computation

Name: Static Case Solution.1

Restraint: Restraints.1

Structural mass is taken into account

Load: Loads.1

Strain Energy : 1.753e-002 J

Equilibrium

Components	Applied Forces	Reactions	Residual	Relative Magnitude Error
Fx (N)	-2.6231e-001	2.6231e-001	-2.6261e-009	1.5344e-011
Fy (N)	-5.3165e-003	5.3165e-003	-8.6703e-009	5.0661e-011
Fz (N)	-1.4850e+003	1.4850e+003	1.1941e-007	6.9772e-010
Mx (Nxm)	2.7170e+000	-2.7170e+000	-1.7319e-007	3.2496e-010

My (Nxm)	-2.2361e+003	2.2361e+003	1.4234e-007	2.6709e-010
Mz (Nxm)	2.1978e-001	-2.1978e-001	1.0224e-008	1.9185e-011

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.2

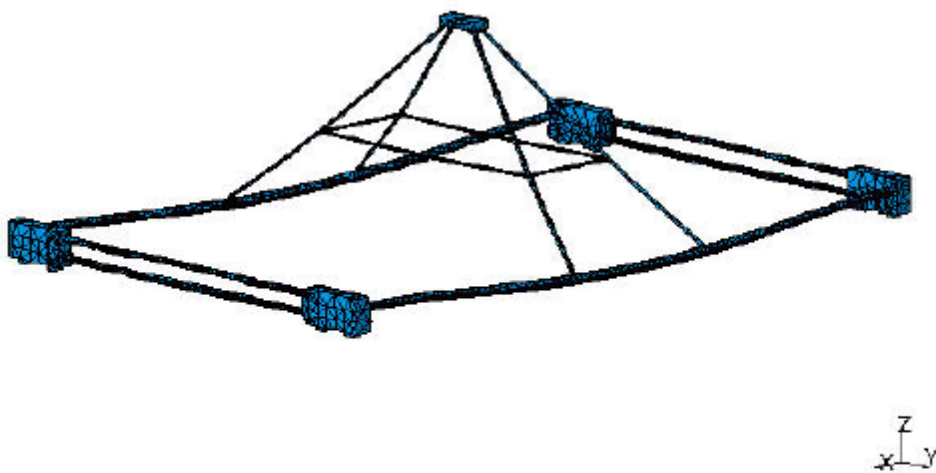


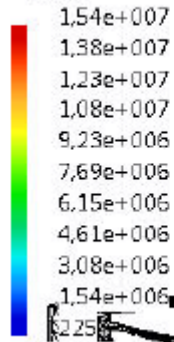
Figure 2

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Von Mises stress (nodal values).1

Von Mises stress (nodal values).1

N_m2



On Boundary

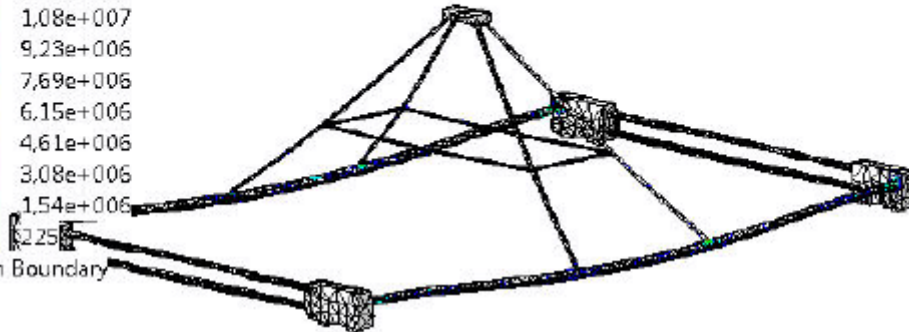


Figure 3

3D elements: : Components: : All

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.1

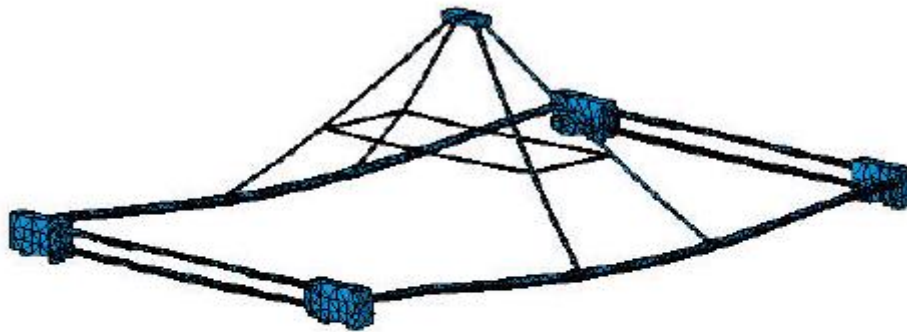


Figure 4



On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Global Sensors

Sensor Name	Sensor Value
Energy	0,018J
Global Error Rate (%)	66,731910706

Anexo 5. Estudio estructural prototipo 4.

Anexo 5

MESH:

Entity	Size
Nodes	4782
Elements	14362

ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
TE4	14362 (100,00%)

ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	4926 (34,30%)	7053 (49,11%)	2383 (16,59%)	0,005	0,236
Aspect Ratio	3551 (24,72%)	4021 (28,00%)	6790 (47,28%)	65,333	8,925

Materials.1

Material	Steel
Young's modulus	2e+011N_m2
Poisson's ratio	0,266
Density	7860kg_m3
Coefficient of thermal expansion	1,17e-005_Kdeg
Yield strength	2,5e+008N_m2

Static Case

Boundary Conditions

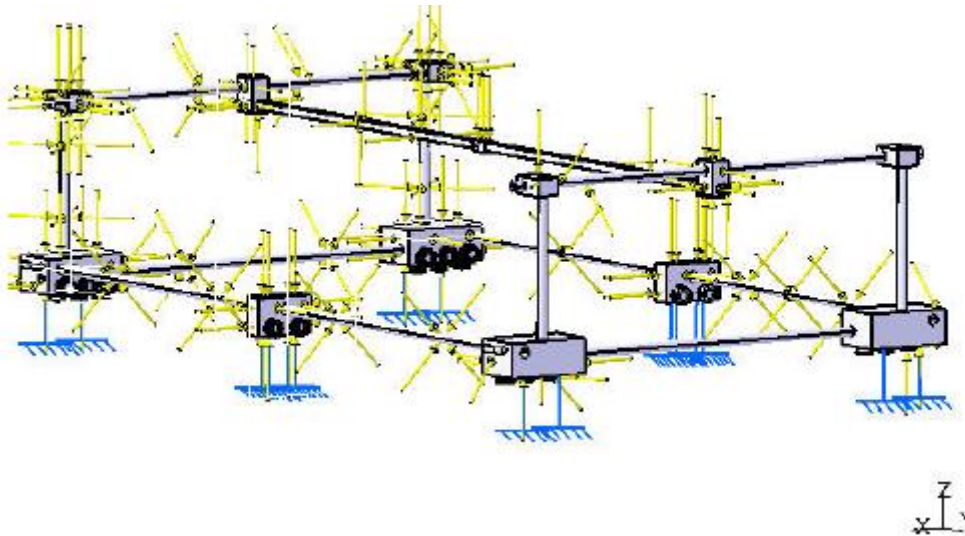


Figure 1

STRUCTURE Computation

Number of nodes	:	4782
Number of elements	:	14362
Number of D.O.F.	:	14346
Number of Contact relations	:	0
Number of Kinematic relations	:	0

Linear tetrahedron : 14362

RESTRAINT Computation

Name: Restraints.1

Number of S.P.C : 699

LOAD Computation

Name: Loads.1

Applied load resultant :

Fx = -8 . 528e-001 N



Fy	=	-3	.	358e-001	N
Fz	=	-1	.	096e+001	N
Mx	=	-1	.	663e+001	Nxm
My	=	-1	.	042e+001	Nxm
Mz	=	1	.	929e+000	Nxm

STIFFNESS Computation

Number of lines	:	14346	
Number of coefficients	:	243540	
Number of blocks	:	1	
Maximum number of coefficients per bloc	:	243540	
Total matrix size	:	2	84 Mb

SINGULARITY Computation

Restraint: Restraints.1

Number of local singularities	:	0
Number of singularities in translation	:	0
Number of singularities in rotation	:	0
Generated constraint type	:	MPC

CONSTRAINT Computation

Restraint: Restraints.1

Number of constraints	:	699
Number of coefficients	:	0
Number of factorized constraints	:	699
Number of coefficients	:	0
Number of deferred constraints	:	0

FACTORIZED Computation

Method	:		SPARSE
Number of factorized degrees	:	13647	
Number of supernodes	:	1166	
Number of overhead indices	:	49362	
Number of coefficients	:	773184	
Maximum front width	:	165	
Maximum front size	:	13695	
Size of the factorized matrix (Mb)	:	5	89893
Number of blocks	:	1	
Number of Mflops for factorization	:	5	615e+001
Number of Mflops for solve	:	3	161e+000
Minimum relative pivot	:	1	940e-005

Minimum and maximum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
2.8769e+006	Ty	4782	2.0955e+002	-1.6519e+001	1.1084e+002
1.2756e+012	Tx	3020	-1.8618e+003	3.1223e+003	5.0712e+001

Minimum pivot

Value	Dof	Node	x (mm)	y (mm)	z (mm)
4.1039e+006	Tz	4782	2.0955e+002	-1.6519e+001	1.1084e+002
6.3205e+006	Tx	4782	2.0955e+002	-1.6519e+001	1.1084e+002
6.3524e+006	Tz	3701	-3.8487e+002	6.9100e+000	7.6273e+002
9.7514e+006	Ty	3700	-3.3116e+002	6.5405e+000	7.6266e+002
1.0620e+007	Tz	2419	-8.7600e+002	1.3115e+003	6.6000e+002
1.2824e+007	Tz	364	-1.7254e+003	-3.0735e+001	5.6414e+002
1.6192e+007	Ty	4058	-1.3913e+001	-6.4368e+001	1.6924e+002
1.6848e+007	Ty	3701	-3.8487e+002	6.9100e+000	7.6273e+002
1.8667e+007	Tz	2055	1.0000e+002	5.5313e+000	7.2756e+002

Translational pivot distribution

Value	Percentage
10.E6 --> 10.E7	3.6638e-002
10.E7 --> 10.E8	2.0517e-001
10.E8 --> 10.E9	2.1543e+000
10.E9 --> 10.E10	3.2996e+001
10.E10 --> 10.E11	5.3785e+001
10.E11 --> 10.E12	1.0786e+001
10.E12 --> 10.E13	3.6638e-002

DIRECT METHOD Computation

Name: Static Case Solution.1

Restraint: Restraints.1

Load: Loads.1

Strain Energy : 1.222e-005 J

Equilibrium

Components	Applied Forces	Reactions	Residual	Relative Magnitude Error
Fx (N)	-8.5275e-001	8.5275e-001	-2.2814e-010	4.7072e-011
Fy (N)	-3.3576e-001	3.3576e-001	-9.0080e-012	1.8586e-012
Fz (N)	-1.0958e+001	1.0958e+001	-6.4386e-009	1.3285e-009
Mx (Nxm)	-1.6633e+001	1.6633e+001	-1.0565e-008	6.6461e-010
My (Nxm)	-1.0421e+001	1.0421e+001	-5.6786e-009	3.5721e-010
Mz (Nxm)	1.9285e+000	-1.9285e+000	8.1232e-011	5.1099e-012

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.2

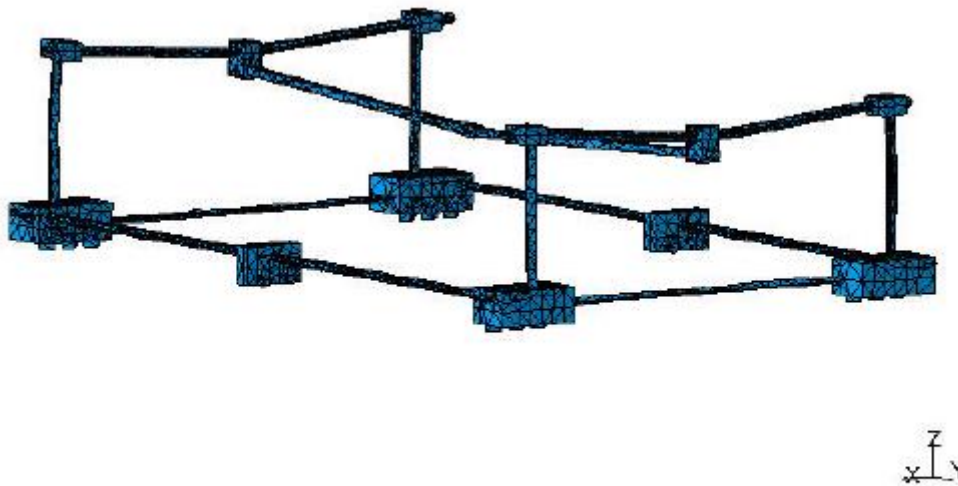


Figure 2

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Von Mises stress (nodal values).1

Von Mises stress (nodal values).1

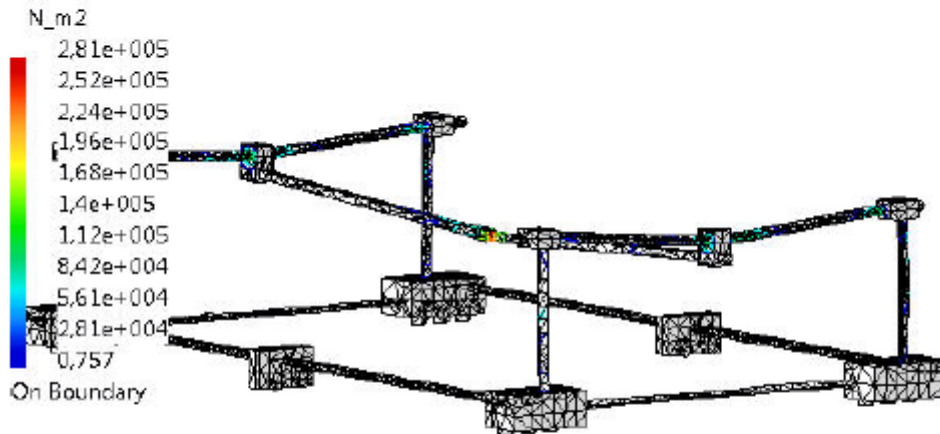


Figure 3

3D elements: : Components: : All

On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Static Case Solution.1 - Deformed mesh.1

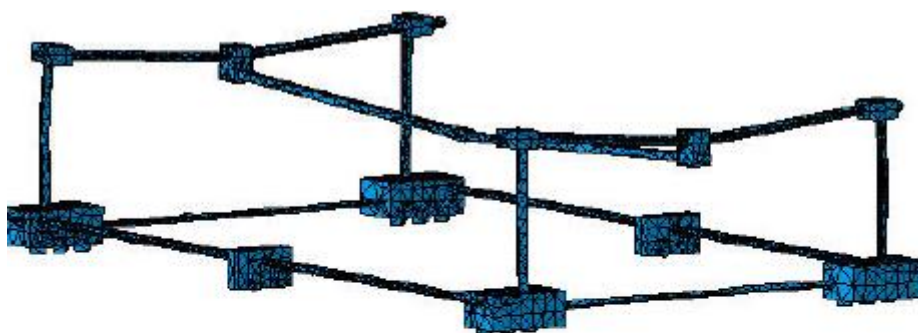


Figure 4



On deformed mesh ---- On boundary ---- Over all the model

Global Sensors

Sensor Name	Sensor Value
Energy	1,222e-005J
Global Error Rate (%)	66,721359253



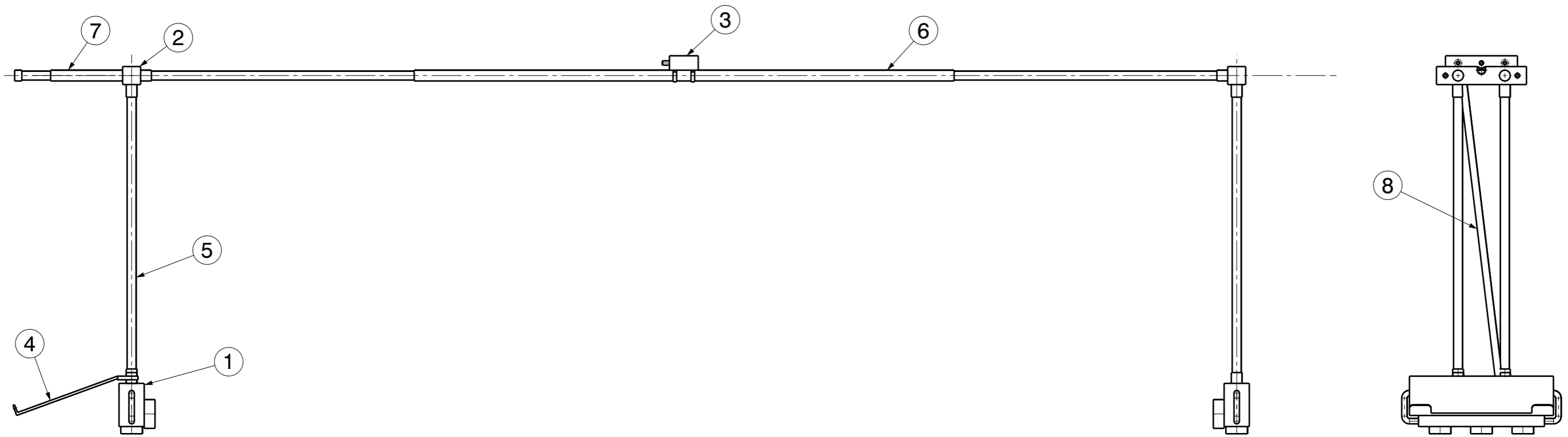


Anexo 6. Planos




	<u>Nº plano</u>
Prototipo 2.....	1
Soporte inferior.....	2
Soporte superior.....	3
Soporte cámara.....	4
Soporte ordenador.....	5
Barra vertical.....	6
Barra horizontal.....	7
Barra voladizo.....	8
Barra inclinada.....	9
Prototipo 3.....	10
Soporte inferior izquierdo.....	11
Soporte inferior derecha.....	12
Soporte inferior polea derecha.....	13
Soporte inferior polea izquierda.....	14
Barra horizontal.....	15
Soporte ordenador.....	16
Soporte cámara.....	17
Barra unión.....	18
Barra soporte.....	19
Barra larga soporte.....	20
Barra corta soporte.....	21
Prototipo 4.....	22
Soporte inferior izquierdo.....	23
Soporte inferior derecho.....	24

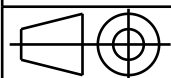
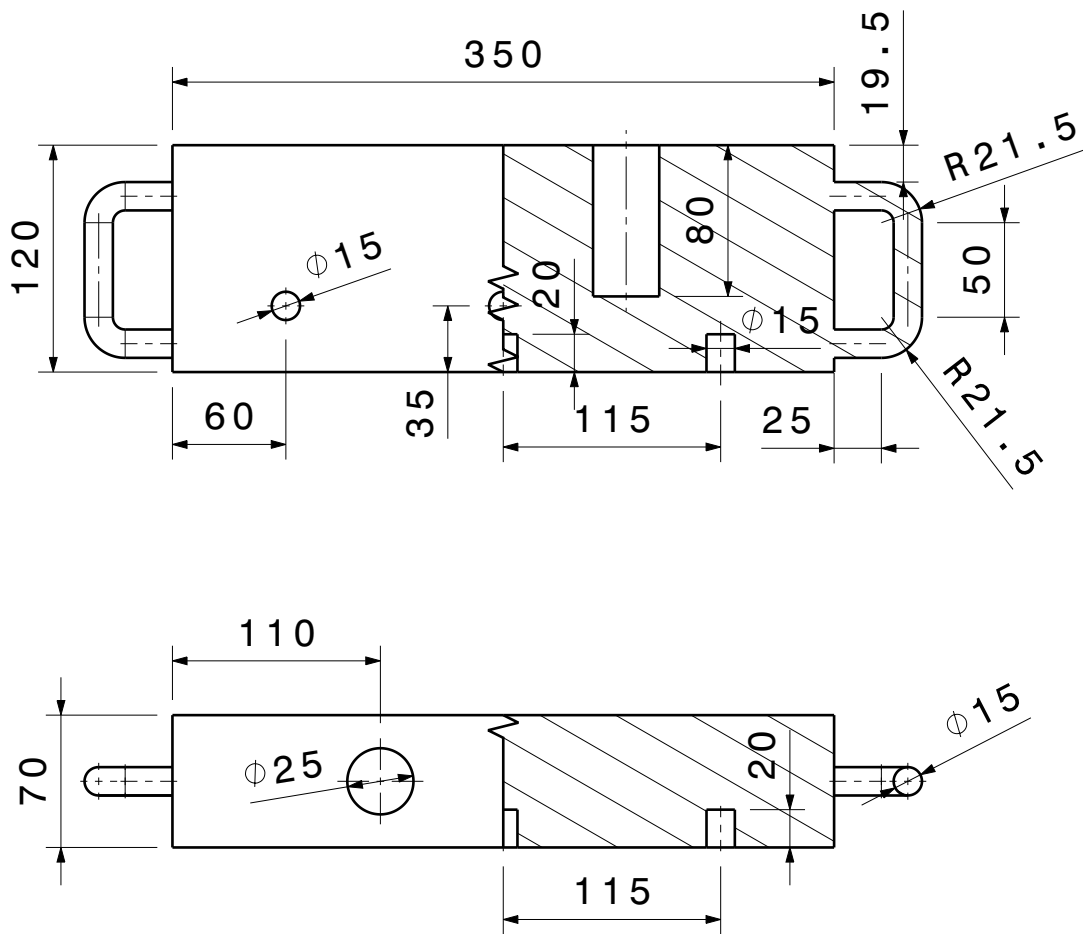


Soporte inferior intermedio.....	25
Soporte extremo.....	26
Soporte superior medio.....	27
Soporte cámara.....	28
Barra tubular cuadrada.....	29
Barra tubular circular.....	30
Soporte ordenador.....	31



2	Barra inclinada	8	Acero	9
2	Barra voladizo	7	Acero	8
2	Barra horizontal	6	Acero	7
4	Barra vertical	5	Acero	6
1	Soporte ordenador	4	Aluminio	5
1	Soporte cámara	3	Aluminio	4
2	Soporte superior	2	Aluminio	3
2	Soporte inferior	1	Aluminio	2
Nº PIEZAS	DENOMINACIÓN Y OBSERVACIONES	MARCA	MATERIAL	Nº PLANO

 DIBUJADO 07/07/2017 COMPROBADO	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado	
			ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	
			 	
PLANO 1	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica	
ESCALA 1:12	PROTOTIPO 2		Apellidos: Gómez Escorial	
			DNI: 70261537-X	



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
2

Denominación

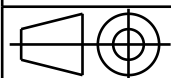
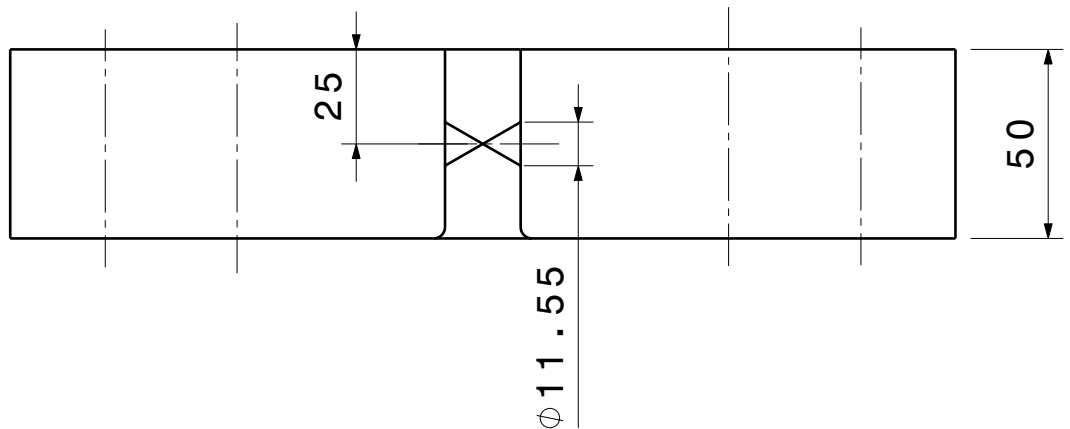
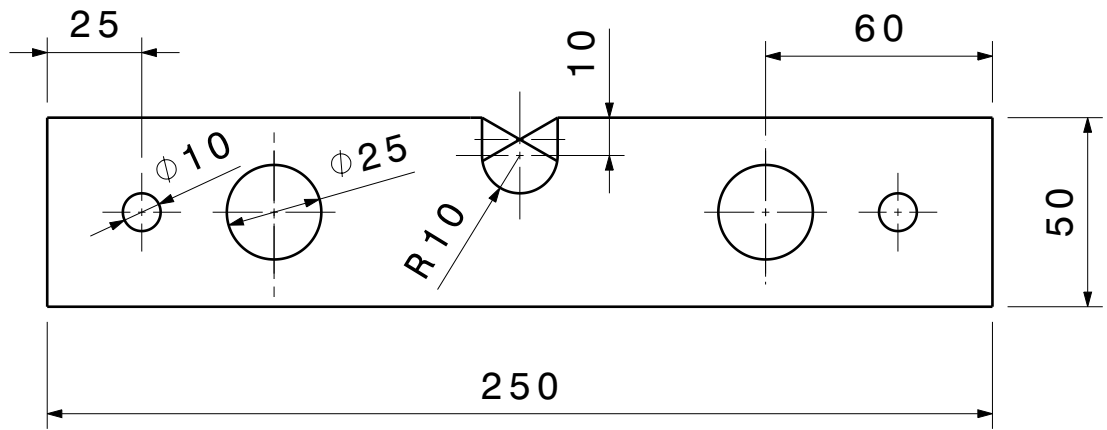
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:4

Soporte inferior

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
3

Denominación

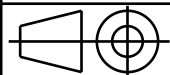
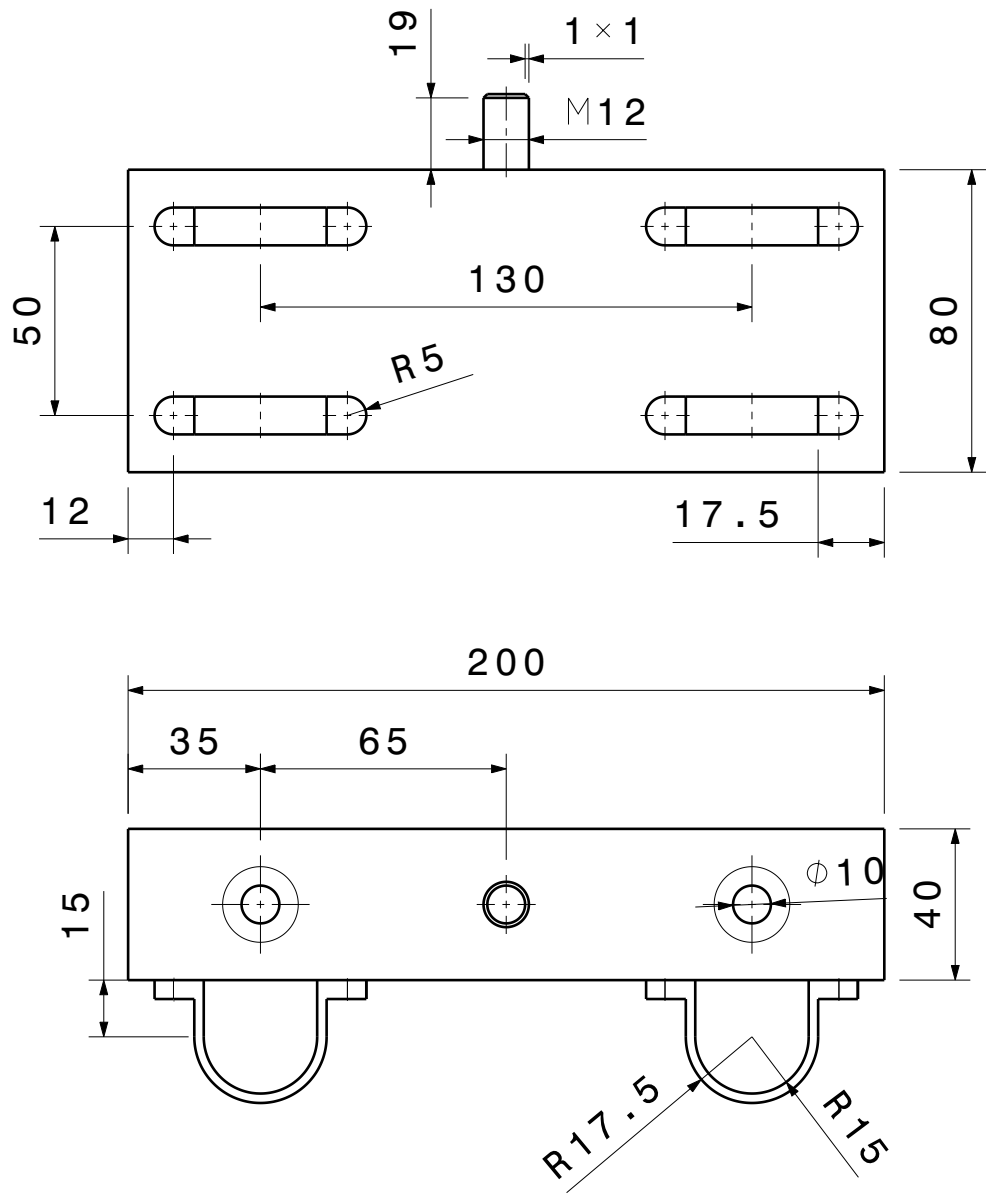
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:2

Soporte superior

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
4

Denominación

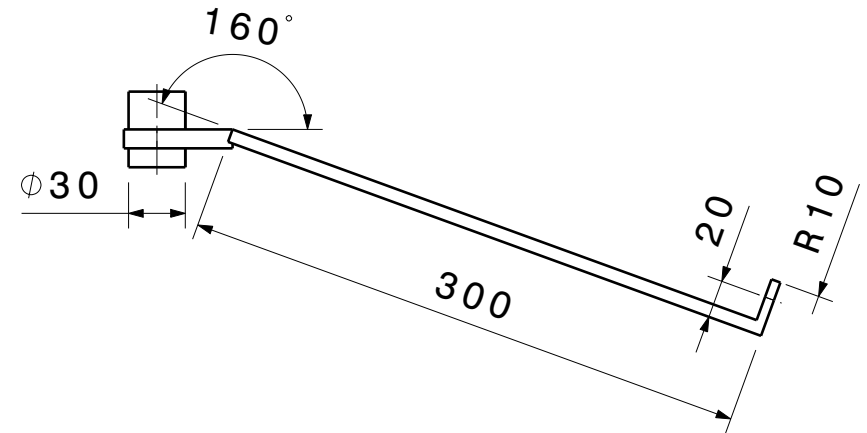
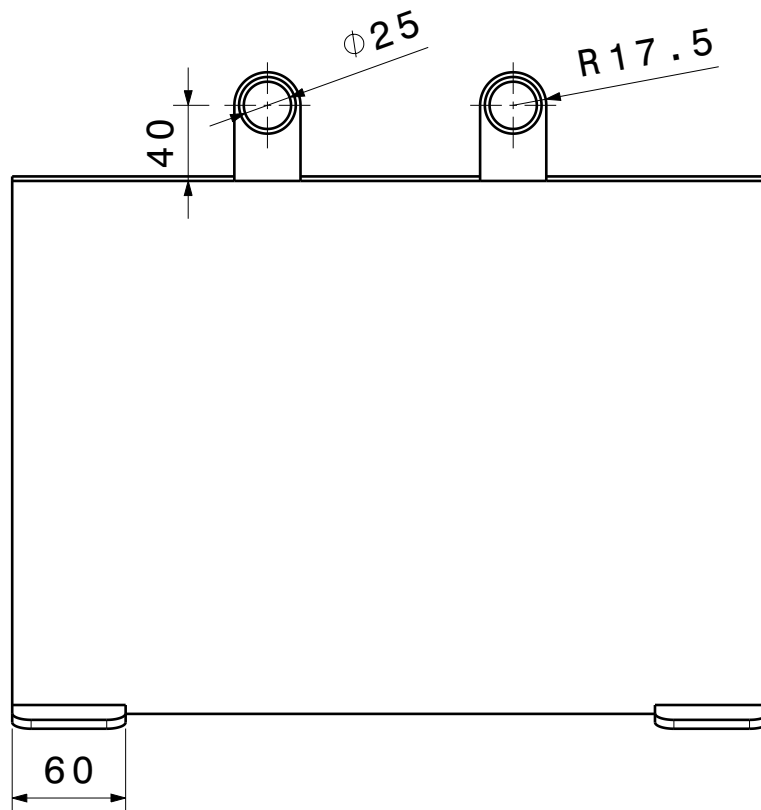
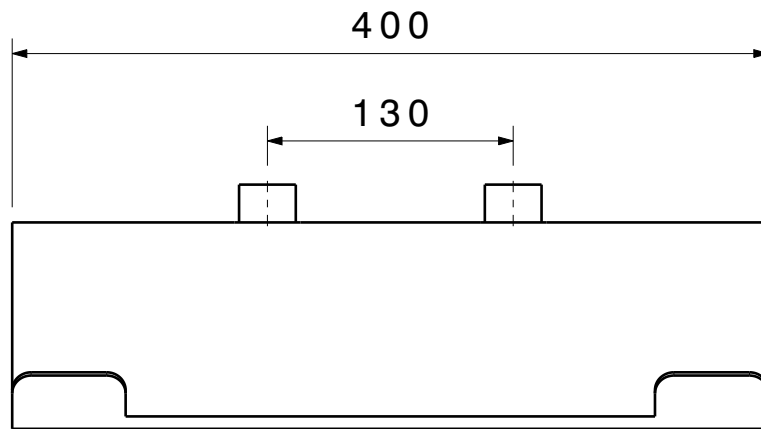
Grado: Ingeniería Mecánica




ESCALA
1:2

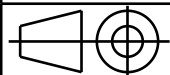
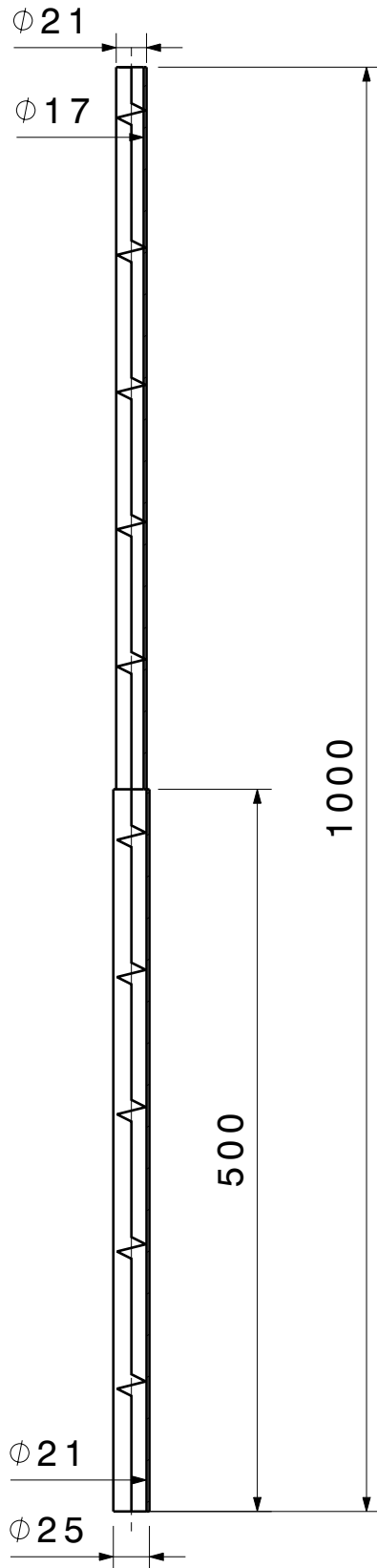
Soporte cámara

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			 
PLANO 5	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
ESCALA 1:4	Soporte ordenador		Apellidos: Gómez Escorial
			DNI: 70261537-X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
6

Denominación

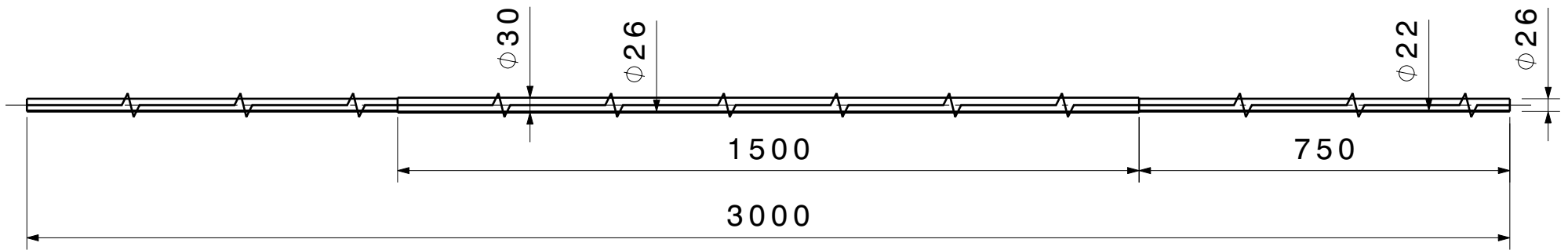
Grado: Ingeniería Mecánica




ESCALA
1:5

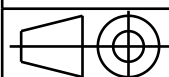
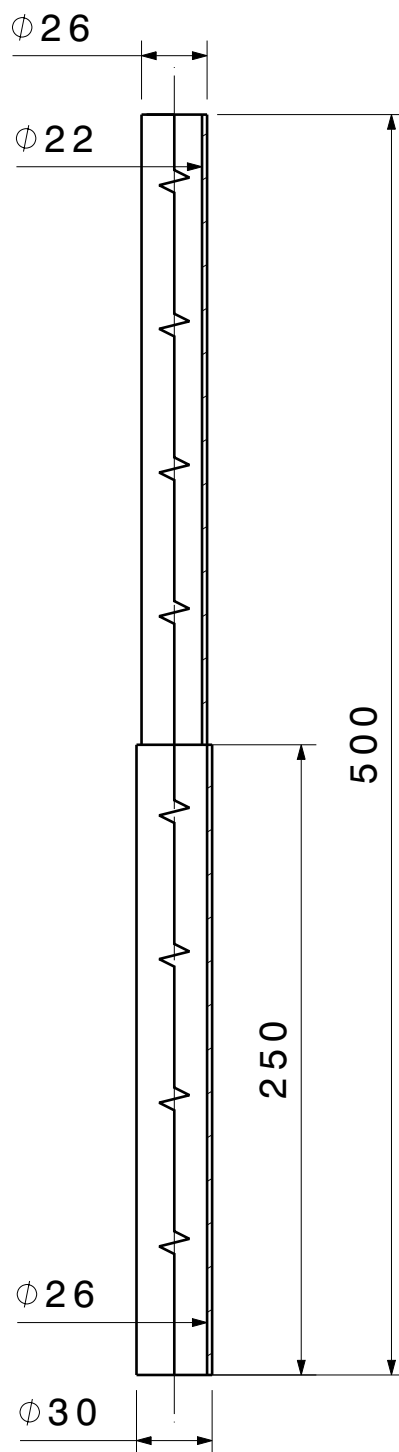
Barra vertical

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado	
	DIBUJADO		07/07/2017	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
COMPROBADO			 	
PLANO 7	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica	
ESCALA 1:12	Barra horizontal		Apellidos: Gómez Escorial	
			DNI: 70261537-X	



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
8

Denominación

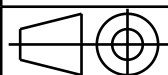
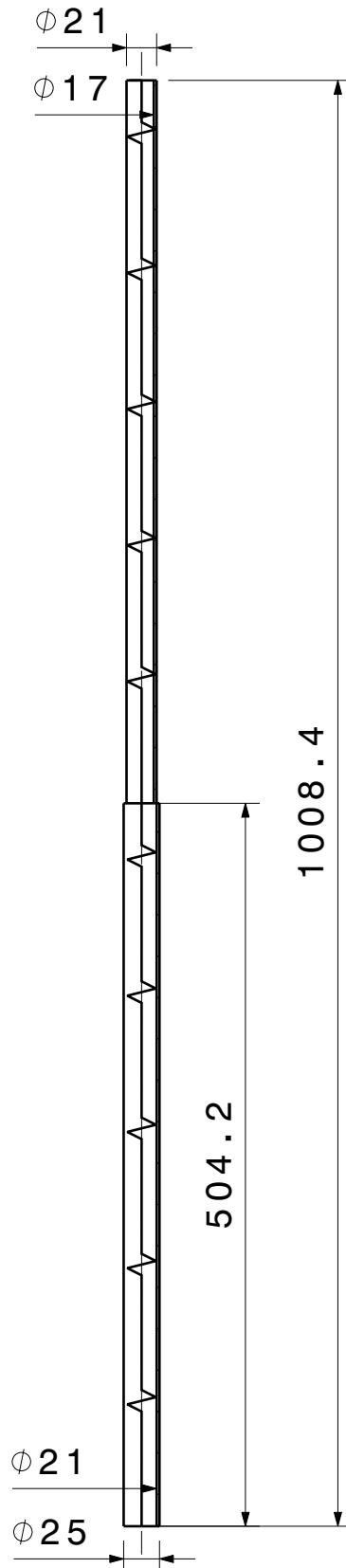
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:3

Barra voladizo

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
9

Denominación

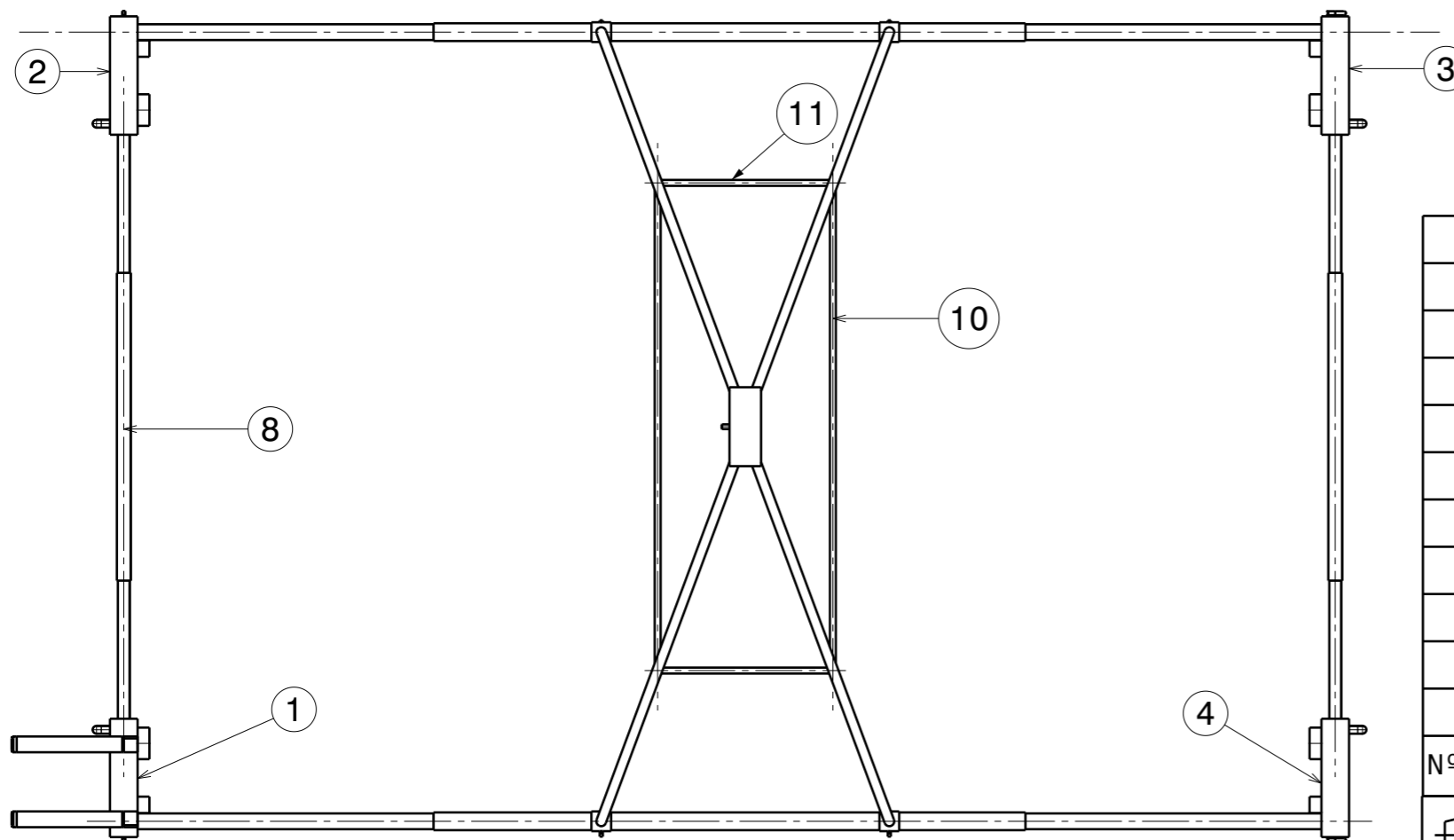
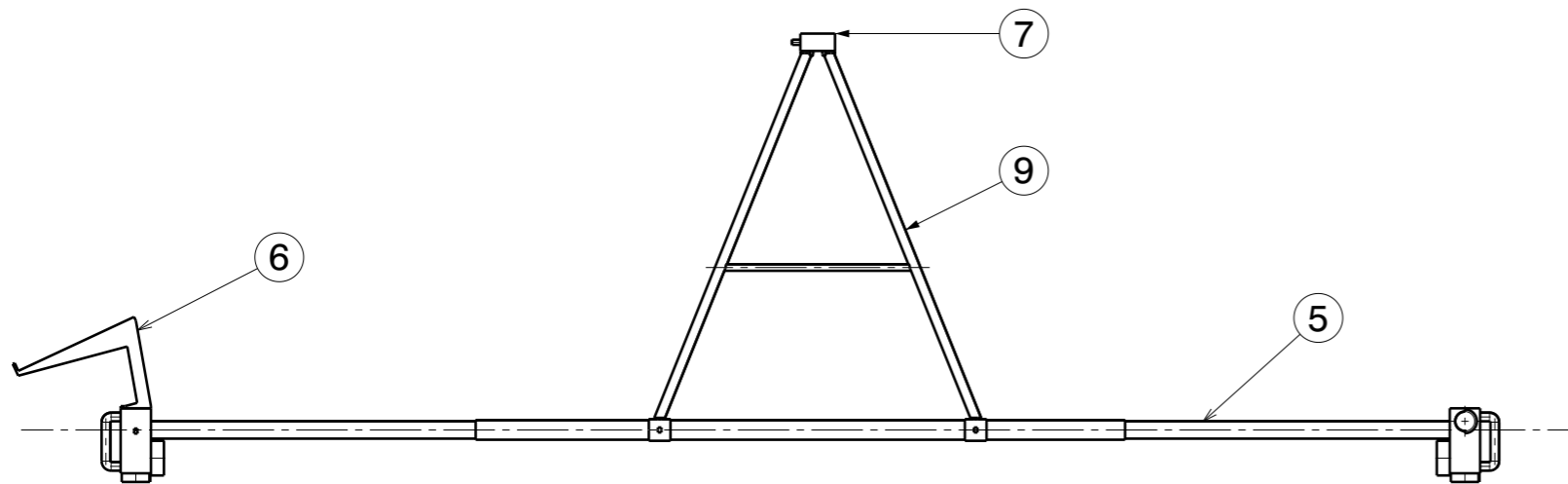
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:5




Barra inclinada

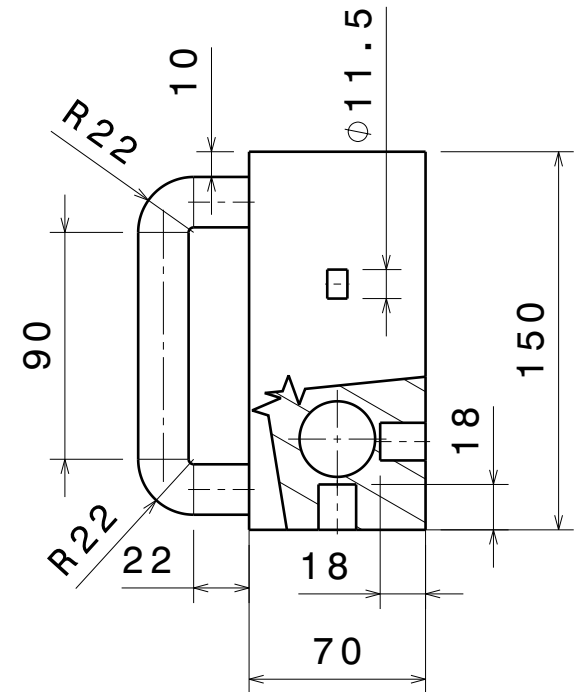
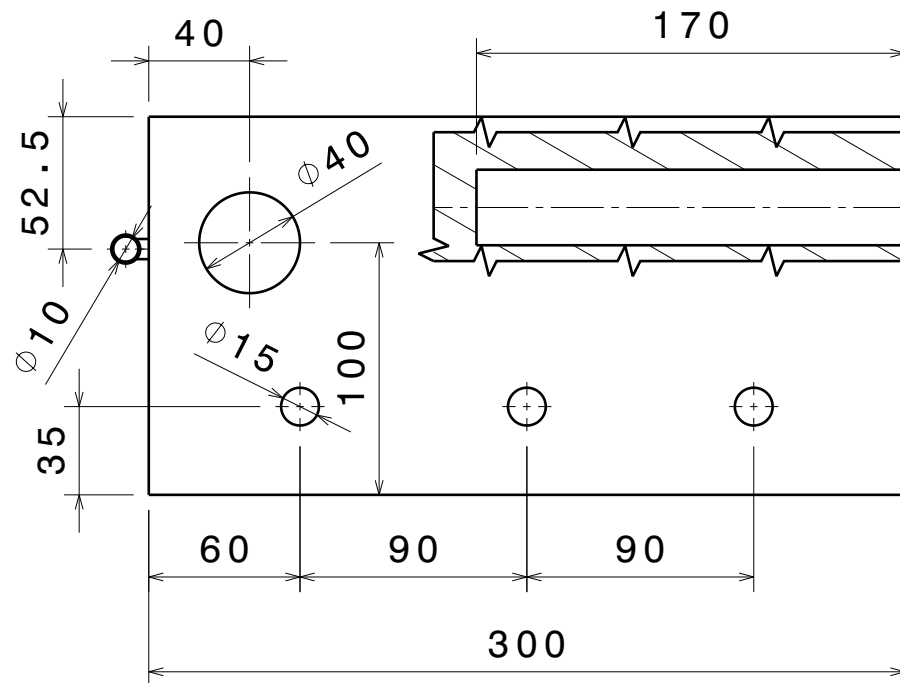
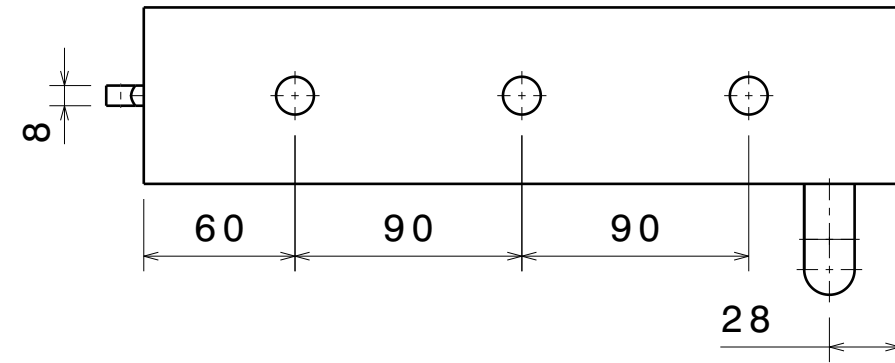
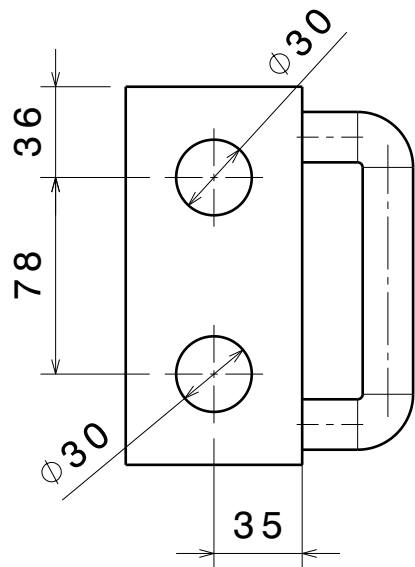
Apellidos: Gómez Escorial



DNI: 70261537X

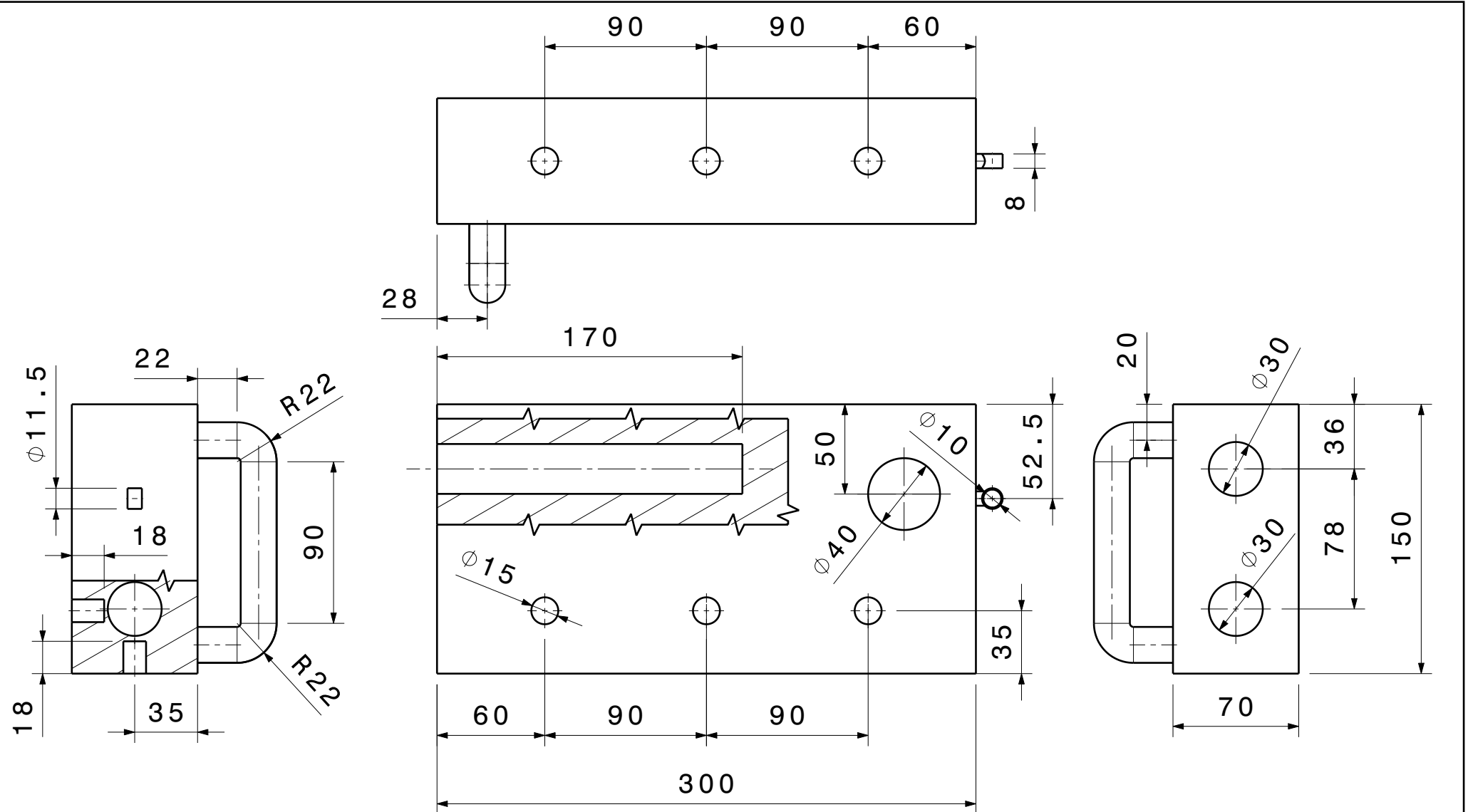





2	Barra corta soporte	11	Acero	21
2	Barra larga soporte	10	Acero	20
4	Barra soporte	9	Acero	19
4	Barra unión	8	Acero	18
1	Soporte cámara	7	Aluminio	17
1	Soporte ordenador	6	Aluminio	16
2	Barra horizontal	5	Acero	15
1	Soporte inf. polea izq.	4	Aluminio	14
1	Soporte inf. polea der.	3	Aluminio	13
1	Soporte inferior der	2	Aluminio	12
1	Soporte inferior izq	1	Aluminio	11
Nº PIEZAS	DENOMINACIÓN Y OBSERVACIONES	MARCA	MATERIAL	Nº PLANO

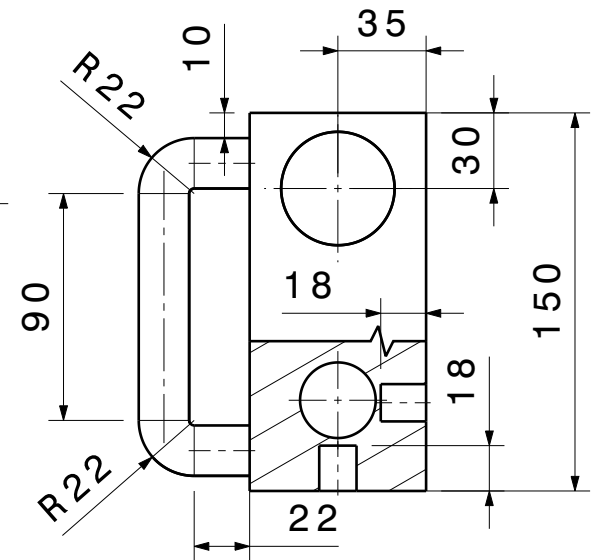
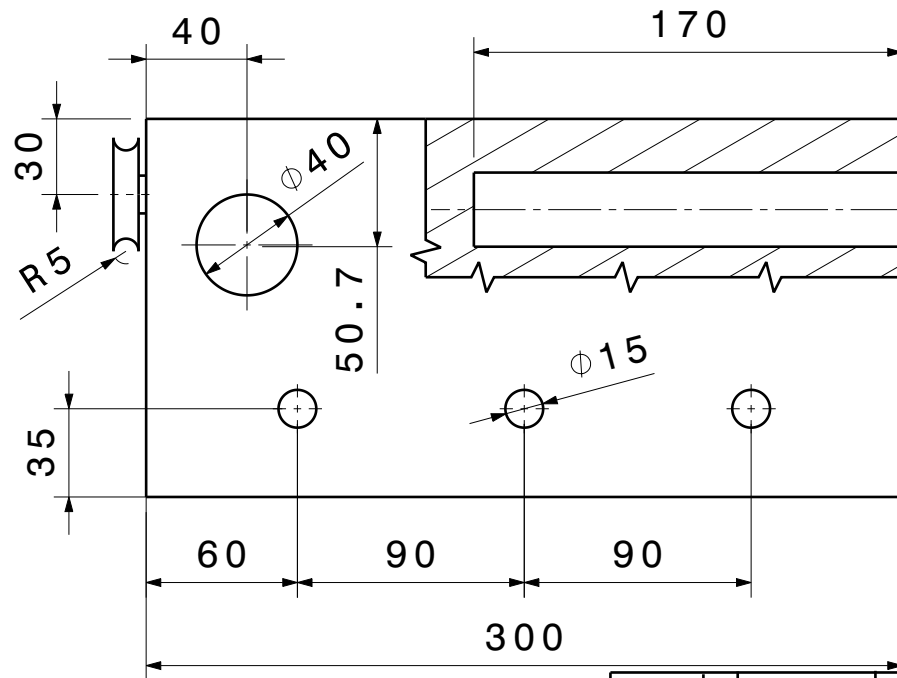
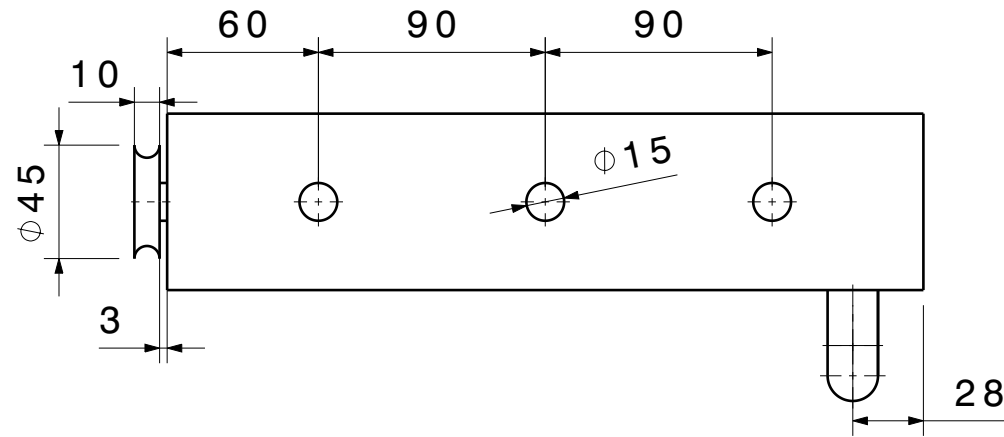
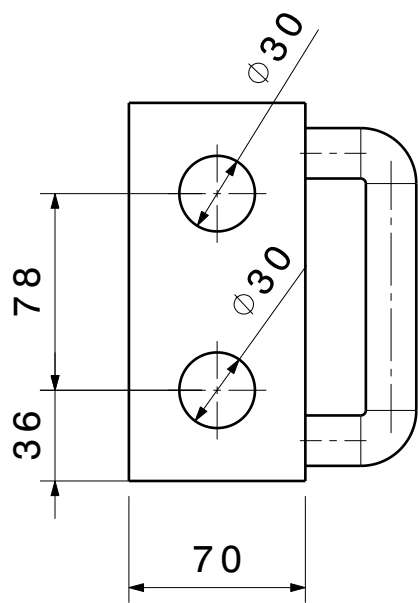
	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado	
	DIBUJADO		07/07/2017	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
COMPROBADO			 	
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica	
10	PROTOTIPO 3		Apellidos: Gómez Escorial	
ESCALA			DNI: 70261537-X	
1:17				






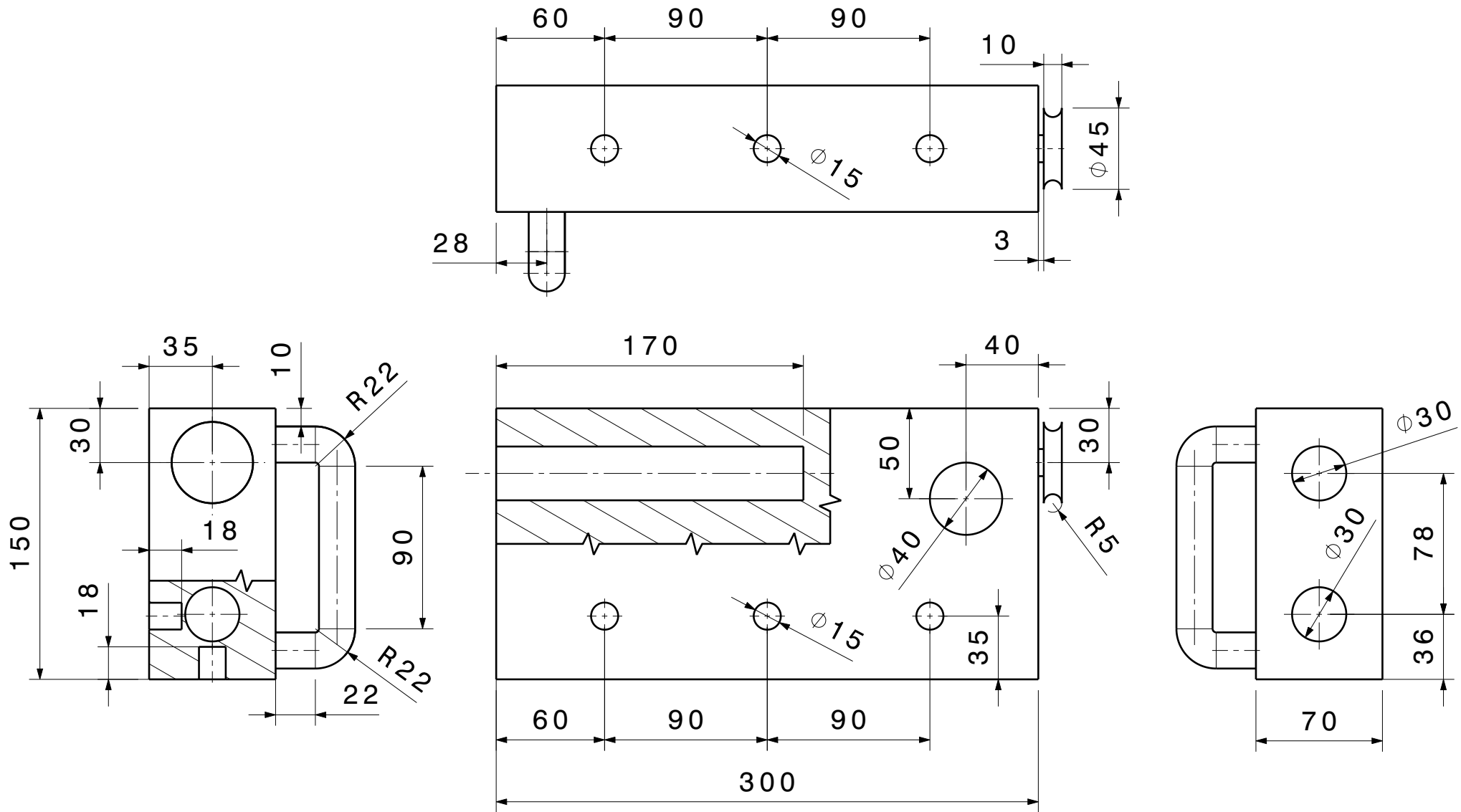
	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			 
PLANO	Denominación Soporte inferior izquierda		Grado: Ingeniería Mecánica
11			Apellidos: Gómez Escorial
ESCALA			DNI: 70261537-X
1:3			



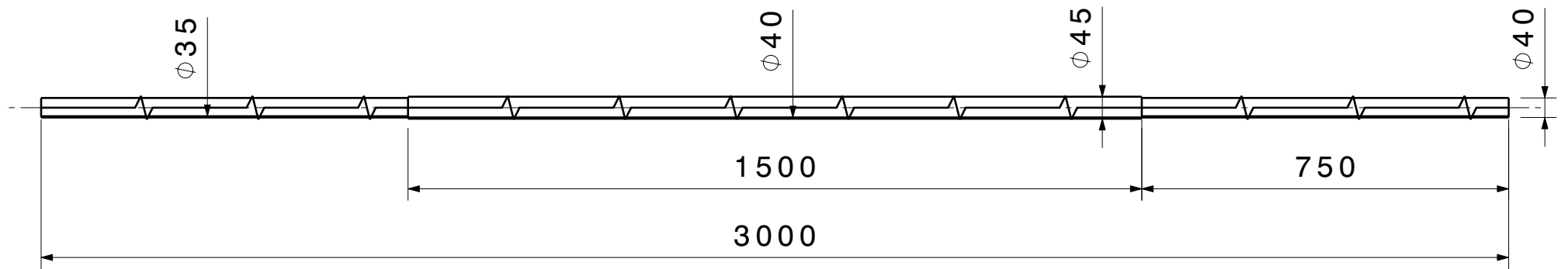
 DIBUJADO COMPROBADO	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	07/07/2017		ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
PLANO 12	Denominación Soporte inferior derecha		  Grado: Ingeniería Mecánica
ESCALA 1:3			Apellidos: Gómez Escorial
			DNI: 70261537-X






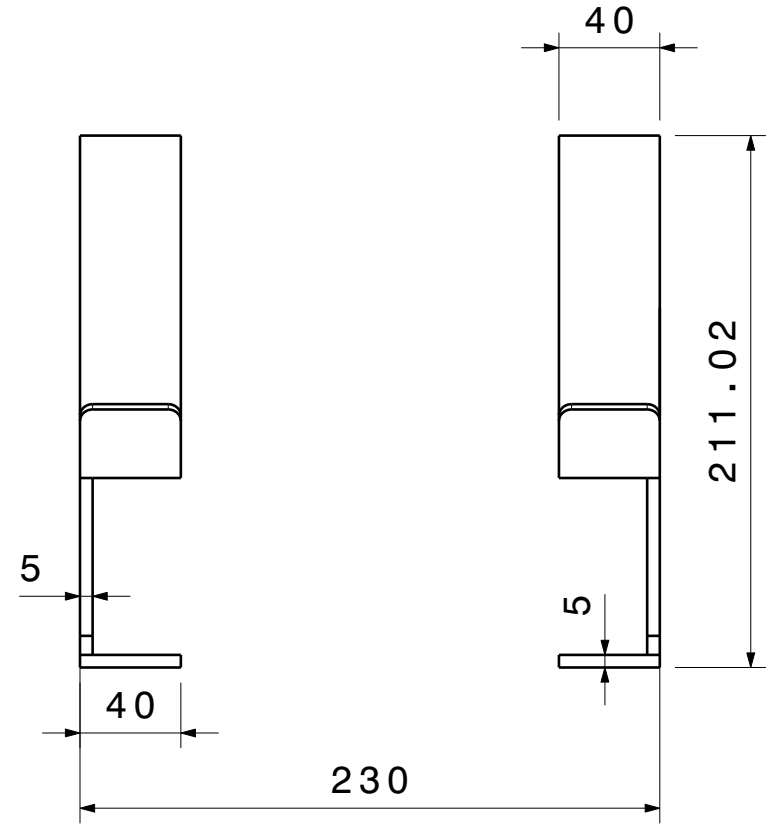
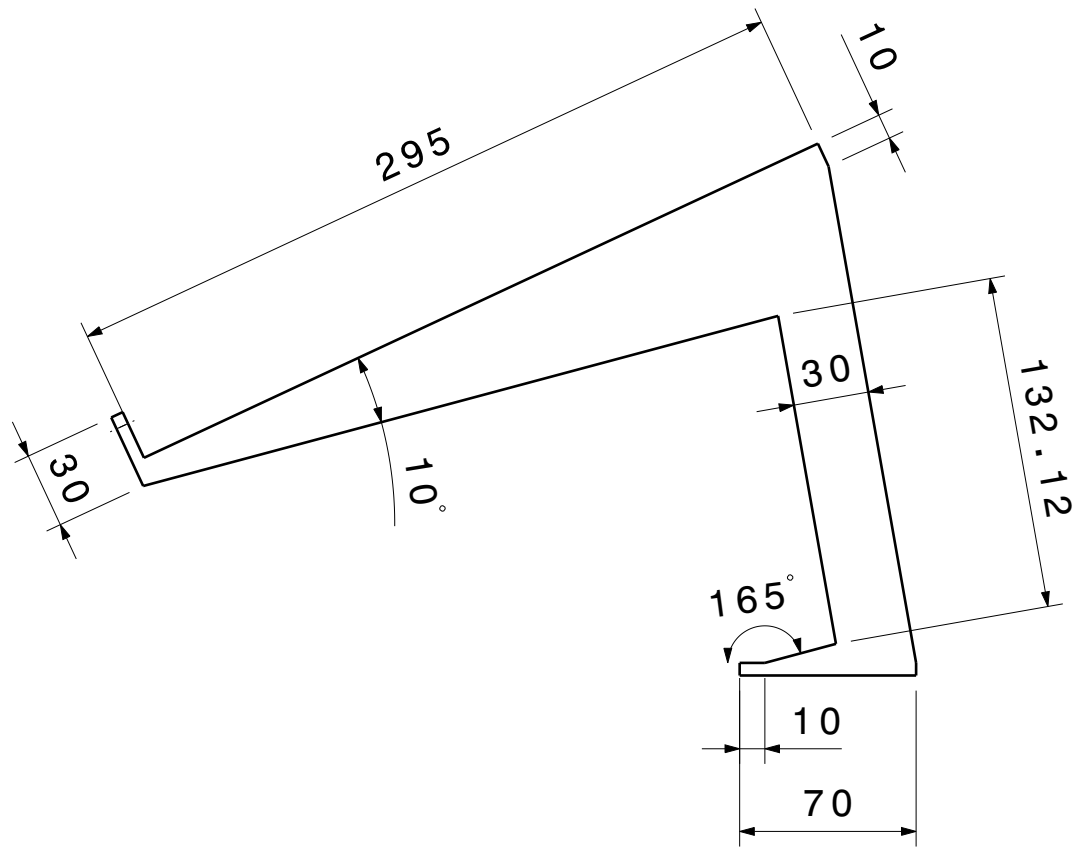
	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado	
	DIBUJADO		07/07/2017	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
COMPROBADO			 	
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica	
13	Soporte inferior		Apellidos: Gómez Escorial	
ESCALA	polea derecha		DNI: 70261537-X	
1:3				






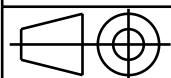
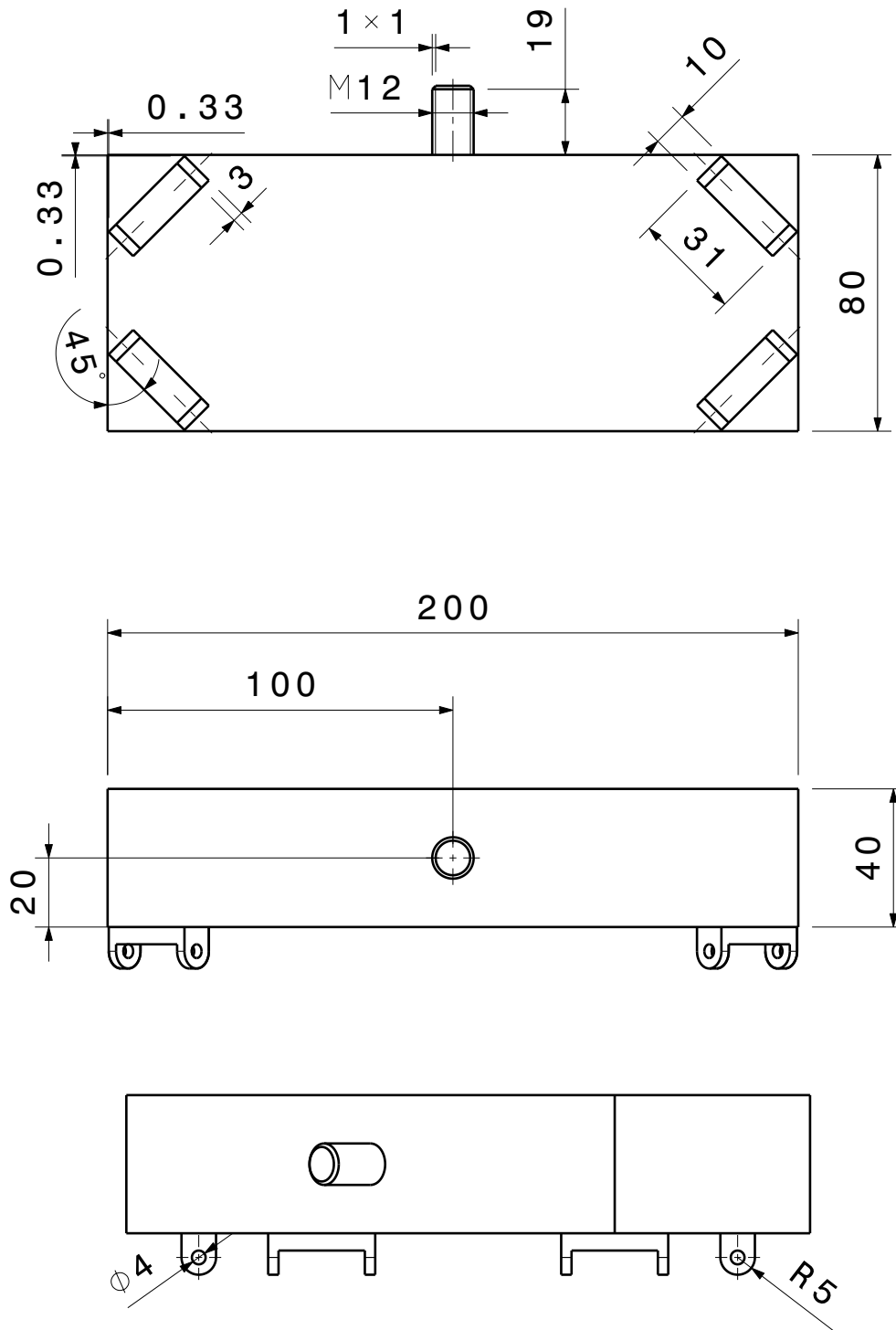
	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
14	Soporte inferior		Apellidos: Gómez Escorial
ESCALA	polea izquierda		DNI: 70261537-X
1:3			



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			 
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
15	Barra horizontal		Apellidos: Gómez Escorial
ESCALA			DNI: 70261537-X
1:12			



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			 
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
16	Soporte ordenador		Apellidos: Gómez Escorial
ESCALA			DNI: 70261537-X
1:3			



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
17

Denominación

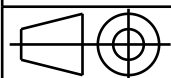
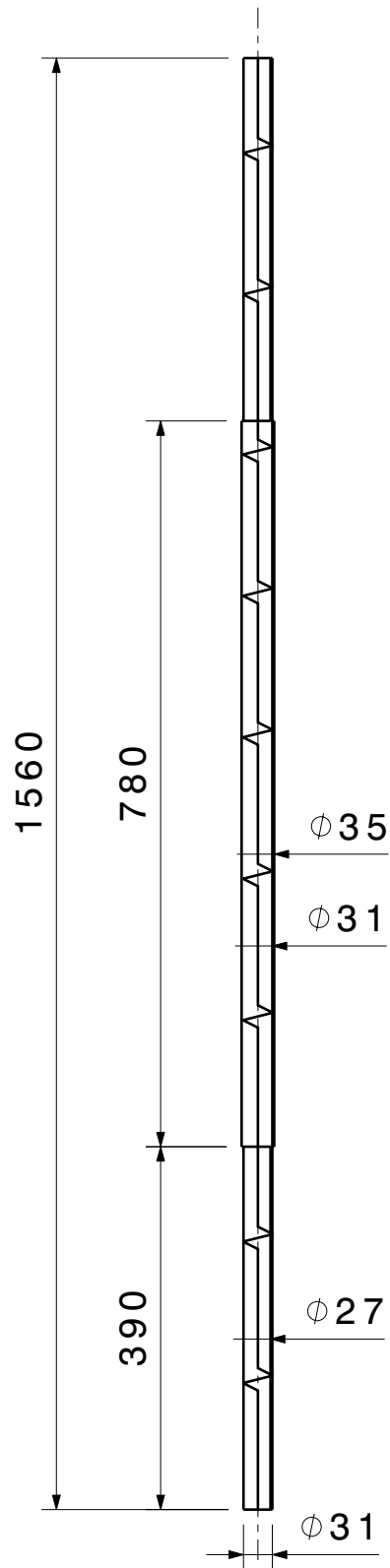
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:2

Soporte cámara

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
18

Denominación

Grado: Ingeniería Mecánica

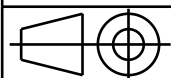
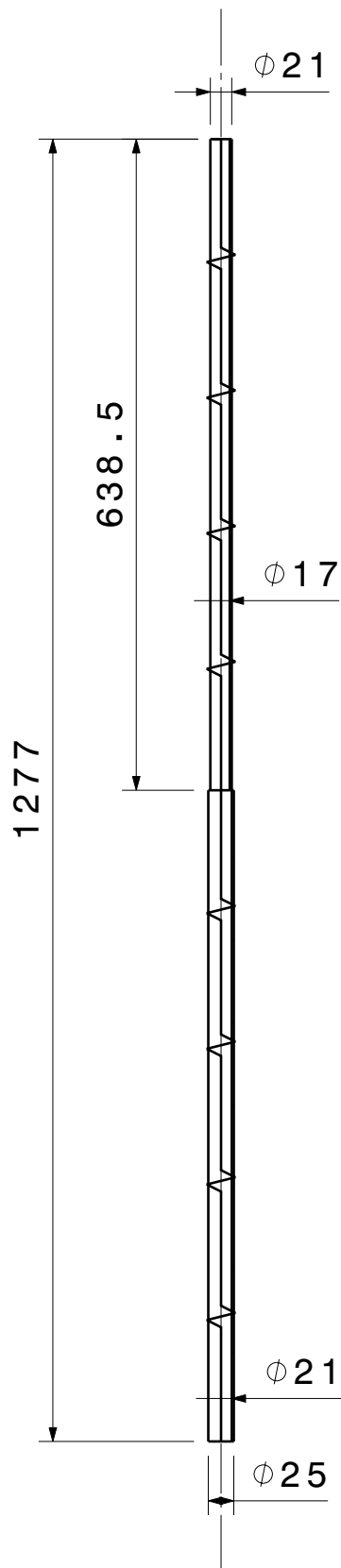
ESCALA

Barra unión

Apellidos: Gómez Escorial

1:8

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
19

Denominación

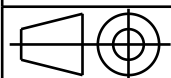
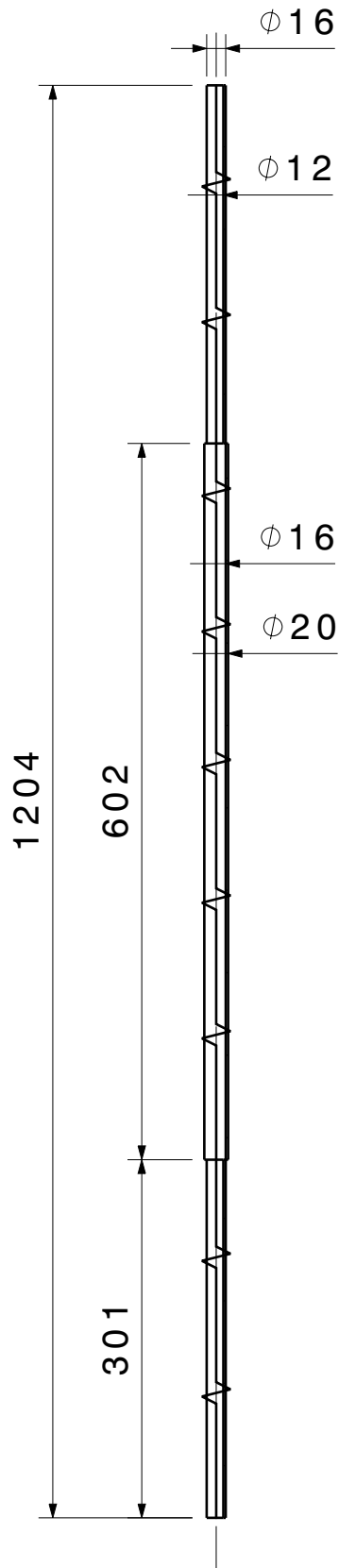
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:7

Barra soporte

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
20

Denominación

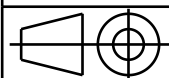
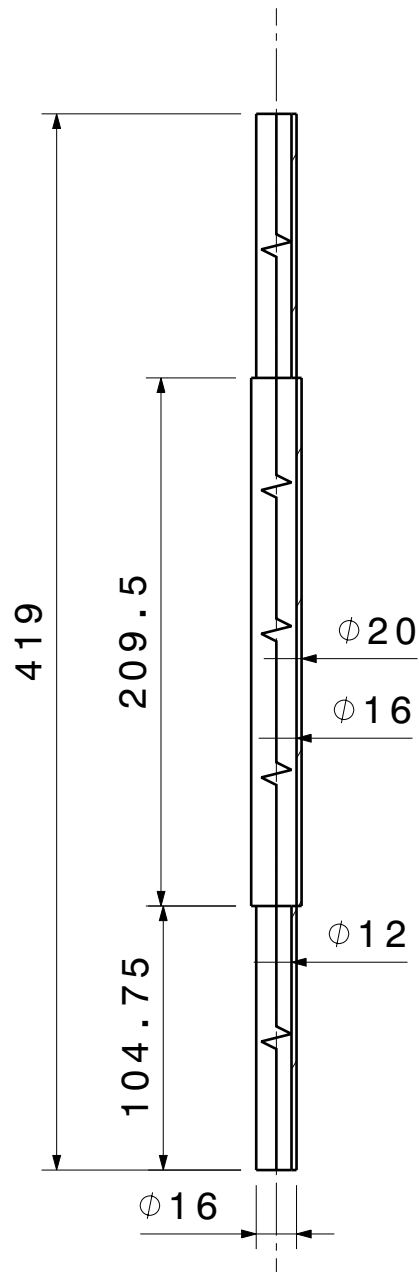
Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:6

Barra larga soporte

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
21

Denominación

Grado: Ingeniería Mecánica

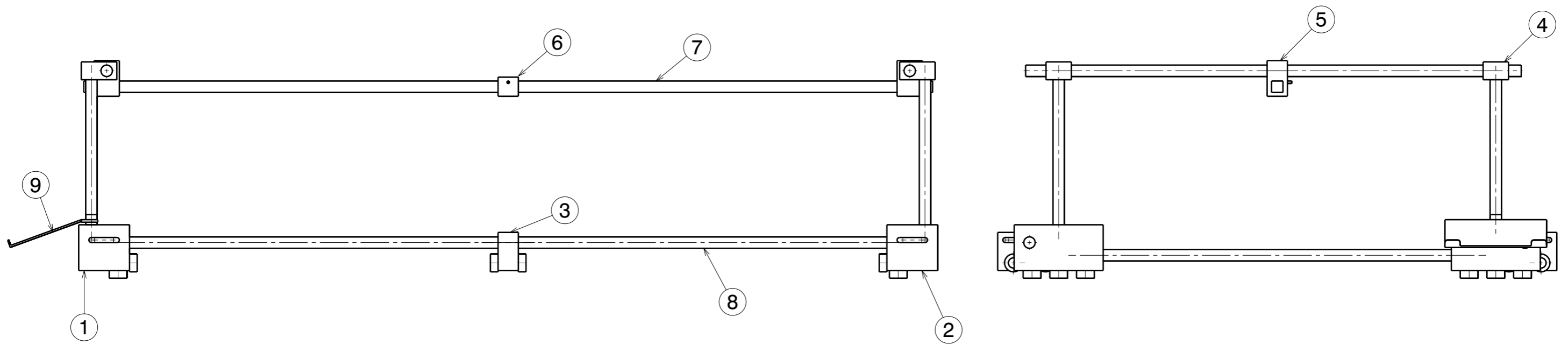
ESCALA

Barra corta soporte

Apellidos: Gómez Escorial

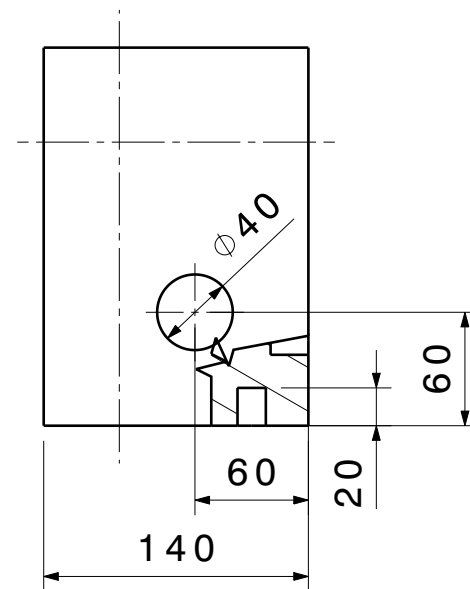
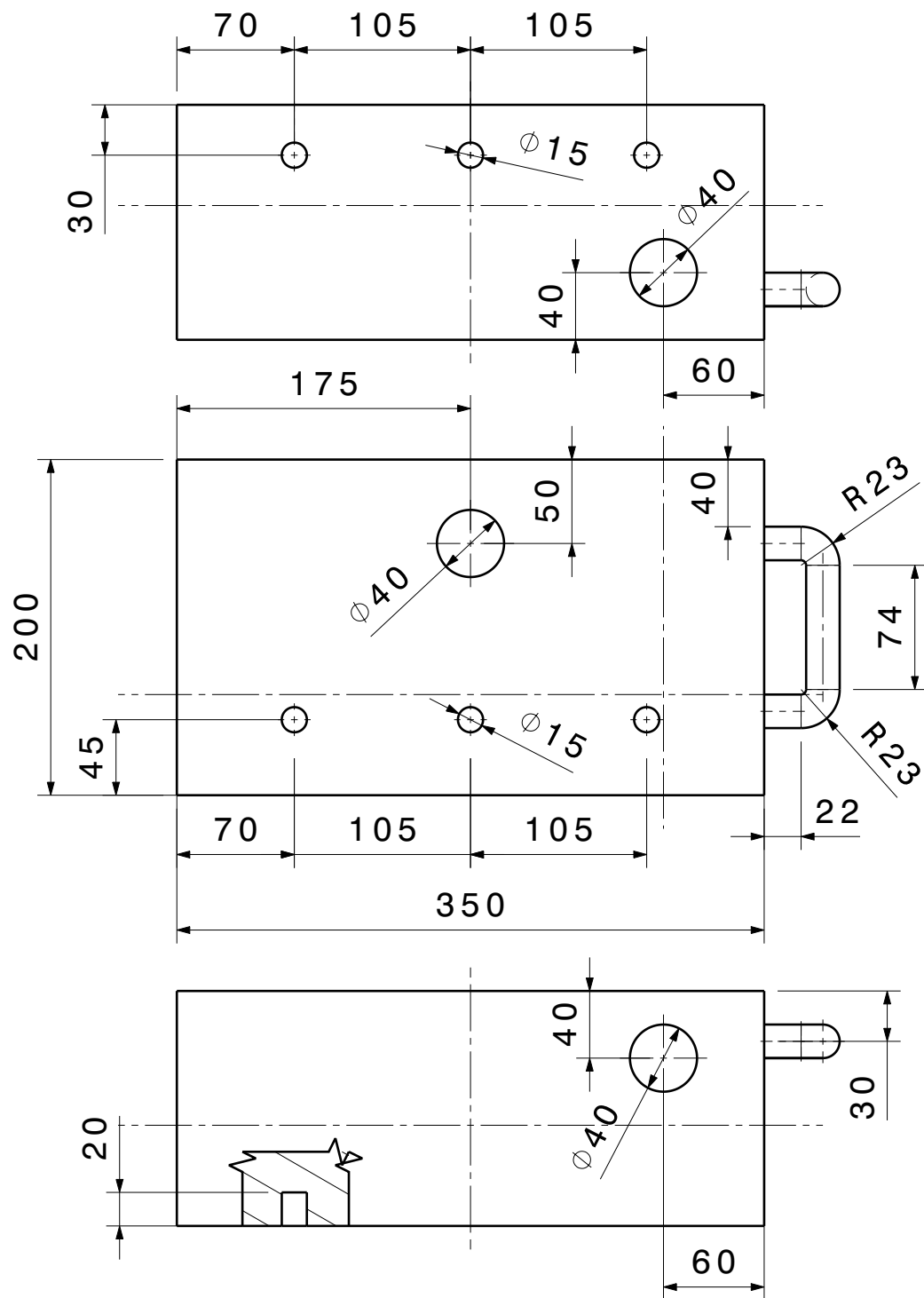
1:3




DNI: 70261537X

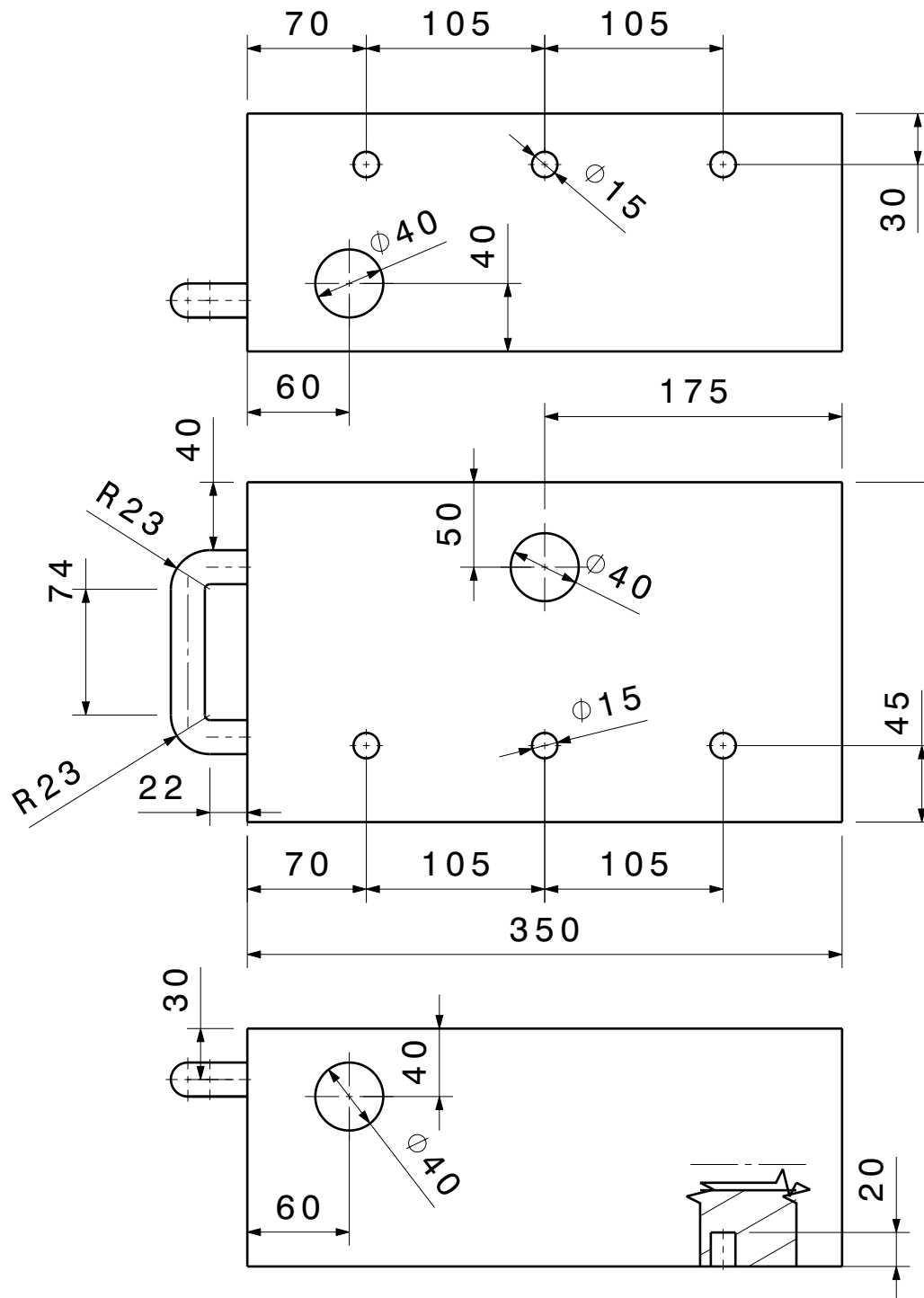





1	Soporte ordenador	9	Aluminio	31
18	Barra tubular circular	8	Acero	30
3	Barra tubular cuadrada	7	Acero	29
1	Soporte cámara	6	Aluminio	28
2	Soporte superior medio	5	Aluminio	27
4	Soporte extremo	4	Aluminio	26
2	Soporte inferior inter.	3	Aluminio	25
2	Soporte inferior dcha.	2	Aluminio	24
2	Soporte inferior izq.	1	Aluminio	23
Nº PIEZAS	DENOMINACIÓN Y OBSERVACIONES	MARCA	MATERIAL	Nº PLANO

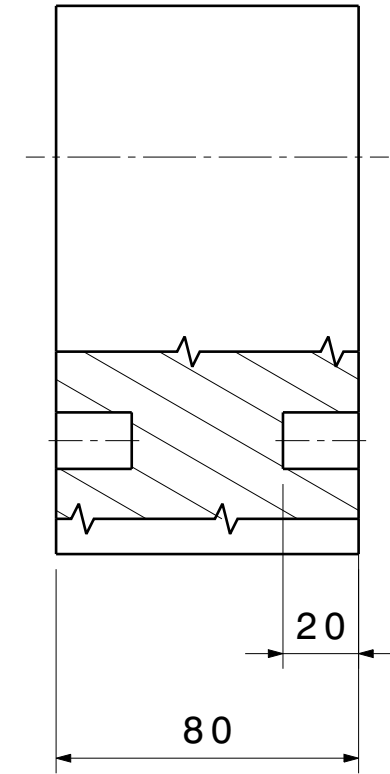
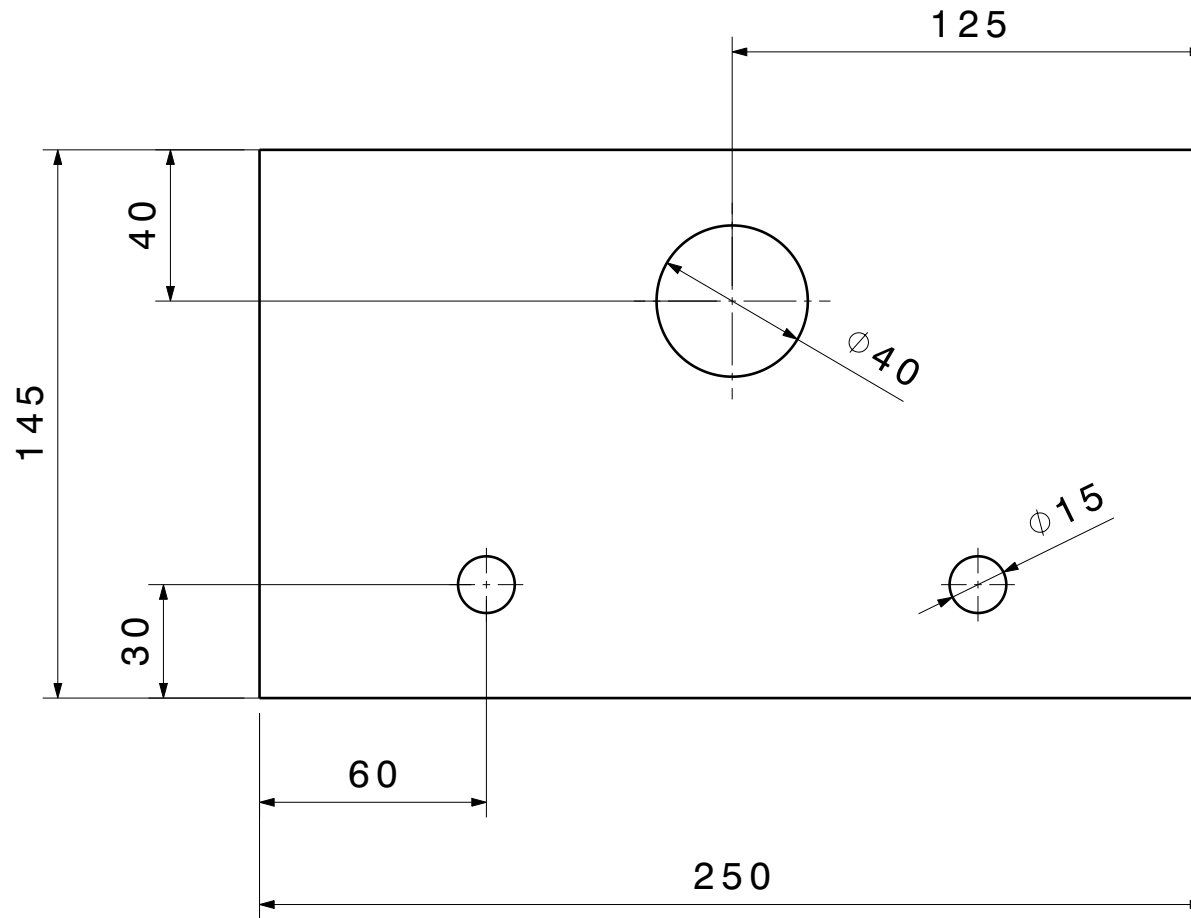
	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado	
	DIBUJADO 07/07/2017		ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	
COMPROBADO				
PLANO 22	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica	
ESCALA 1:16	PROTOTIPO 4		Apellidos: Gómez Escorial	
			DNI: 70261537-X	






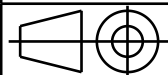
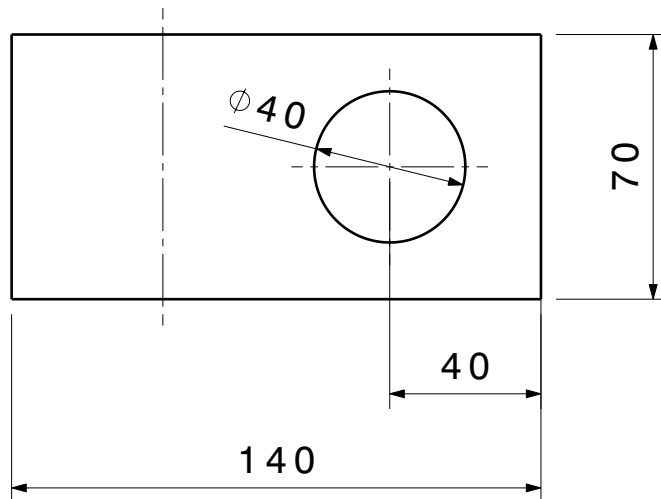
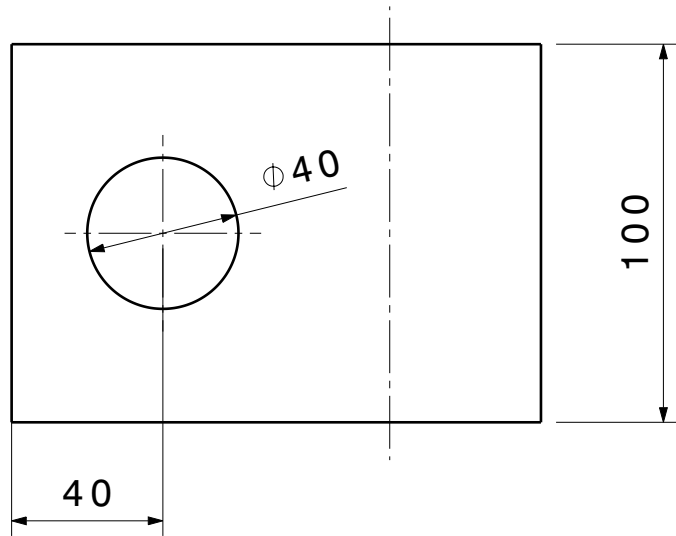
	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			 
PLANO 23	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
ESCALA 1:4	Soporte inferior izquierdo		Apellidos: Gómez Escorial
			DNI: 70261537-X



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado	
	DIBUJADO		07/07/2017	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
COMPROBADO			 	
PLANO 24	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica	
ESCALA 1:4	Soporte inferior derecho		Apellidos: Gómez Escorial	
			DNI: 70261537-X	



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			  <small>Universidad de Valladolid</small>
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
25	Soporte inferior intermedio		Apellidos: Gómez Escorial
ESCALA			DNI: 70261537-X
1:2			



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
26

Denominación

Grado: Ingeniería Mecánica

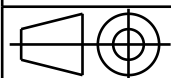
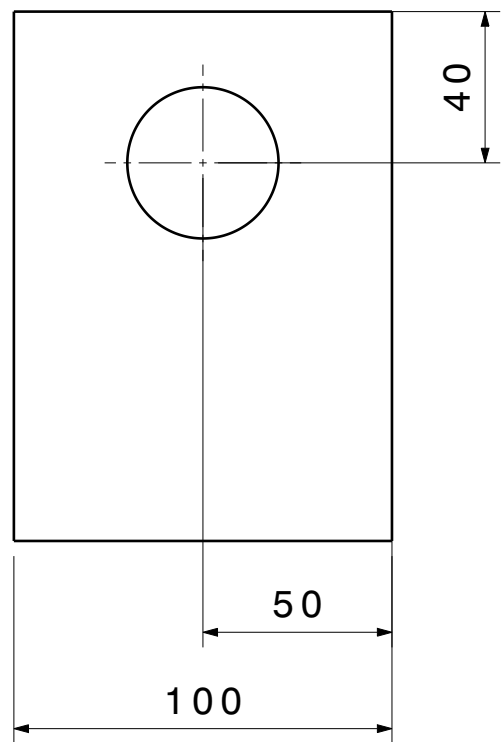
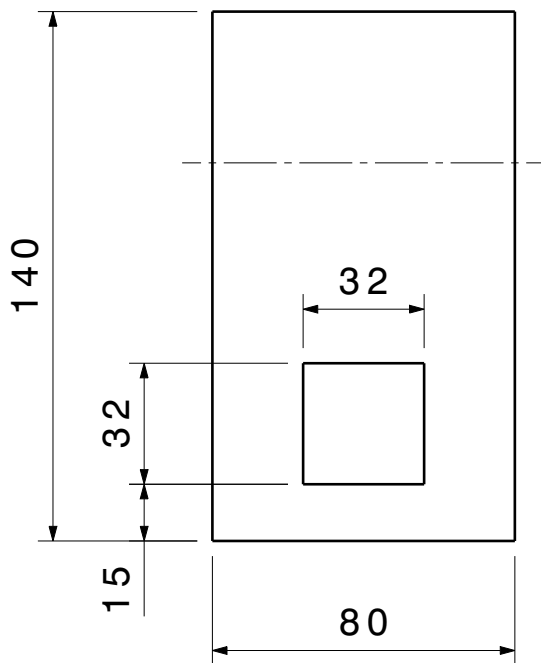
ESCALA

1:2

Soporte extremo

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
27

Denominación

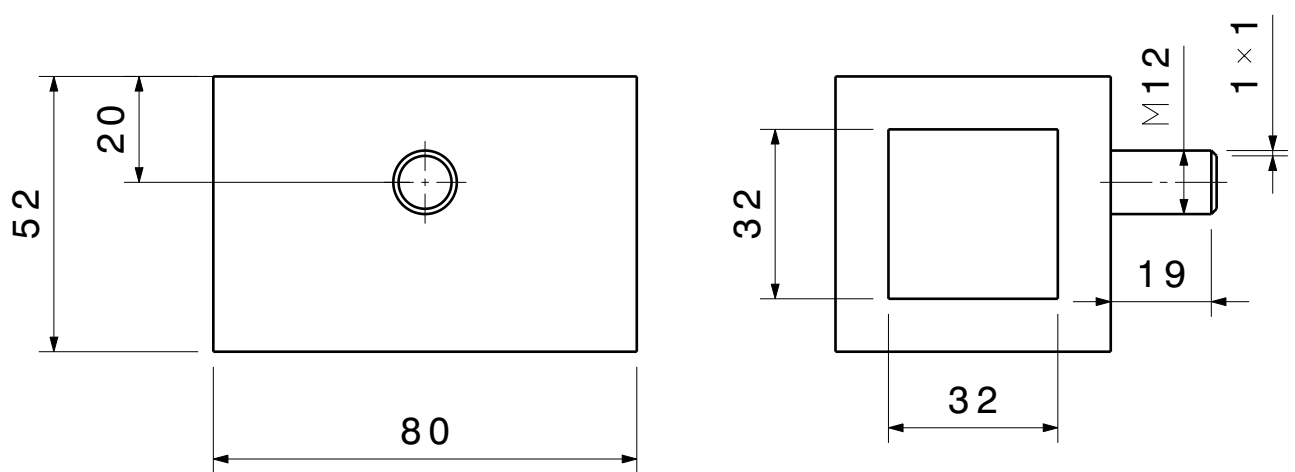
Grado: Ingeniería Mecánica

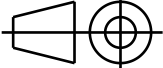


ESCALA
1:2

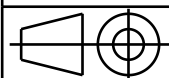
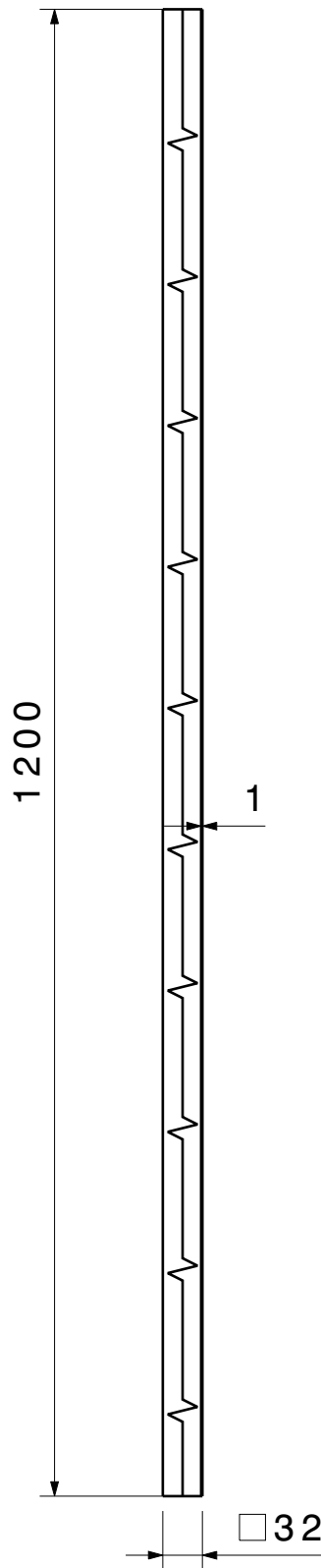
Soporte superior medio

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado		
	DIBUJADO		07/07/2017	ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES	
	COMPROBADO			 	
PLANO 28	Denominación Soporte cámara		Grado: Ingeniería Mecánica		
ESCALA 7:10			Apellidos: Gómez Escorial		
			DNI: 70261537X		



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

DIBUJADO

07/07/2017

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
29

Denominación

Grado: Ingeniería Mecánica

ESCALA
1:7

Barra tubular cuadrada

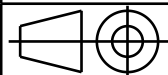
Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X

1000

$\phi 36$

$\phi 40$



FECHA

FIRMA

Trabajo Fin de Grado

ESCUELA INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DIBUJADO

07/07/2017

COMPROBADO



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

PLANO
30

Denominación

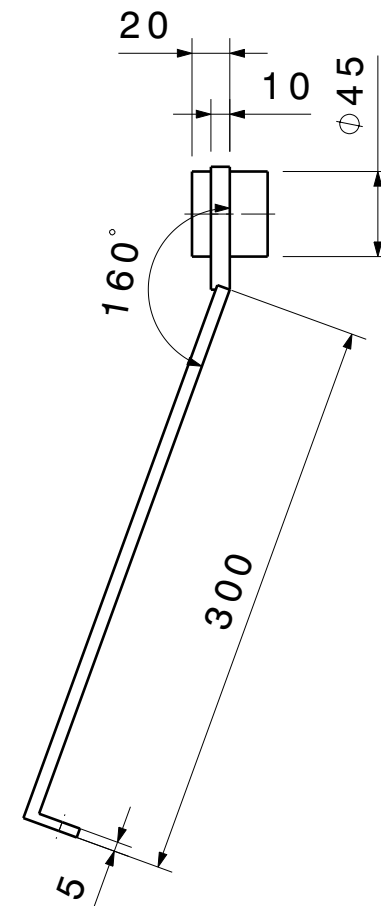
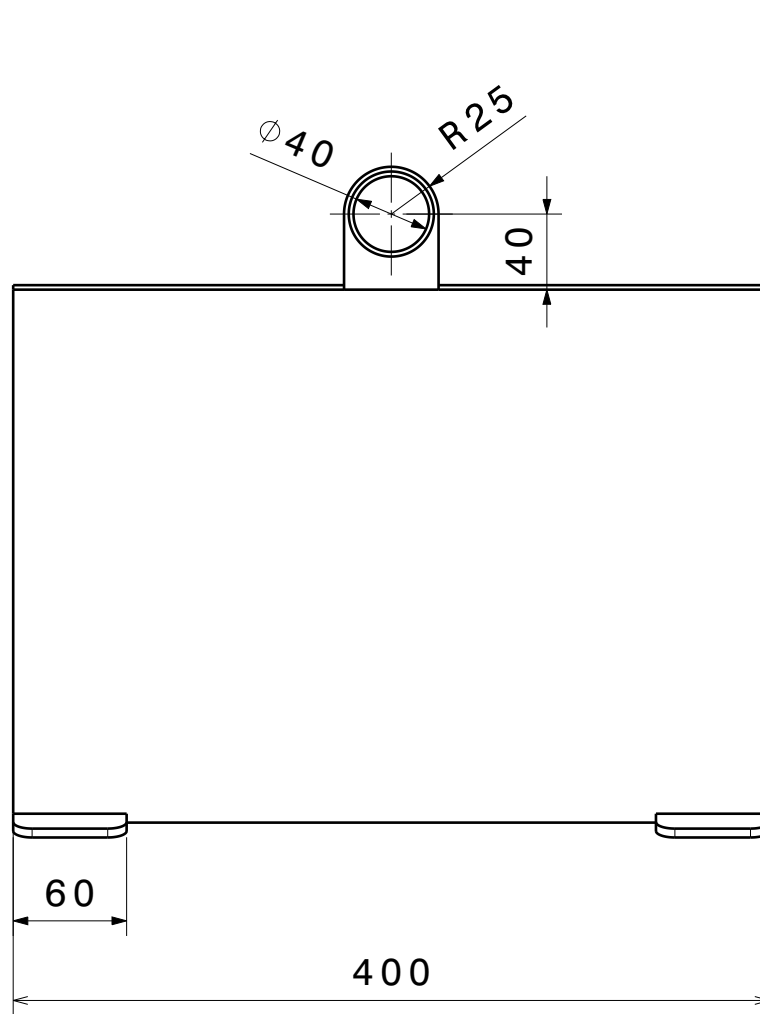
Grado: Ingeniería Mecánica




ESCALA
1:5

Barra tubular circular

Apellidos: Gómez Escorial

DNI: 70261537X



	FECHA	FIRMA	Trabajo Fin de Grado
	DIBUJADO		07/07/2017
COMPROBADO			 
PLANO	Denominación		Grado: Ingeniería Mecánica
31	Soporte ordenador		Apellidos: Gómez Escorial
ESCALA			DNI: 70261537-X
1:4			