

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño y desarrollo de un sensor solar ultra-preciso
empleando procesamiento de imagen para sistemas
de control de orientación de satélites

Autor: José Ángel Morató Pérez

Tutor: José Manuel Quero Reboul

Dpto. Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Diseño y desarrollo de un sensor solar ultra-preciso
empleando procesamiento de imagen para sistemas
de control de orientación de satélites**

Autor:

José Ángel Morató Pérez

Tutor:

José Manuel Quero Reboul

Catedrático

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Diseño y desarrollo de un sensor solar ultra-preciso empleando procesamiento de imagen para sistemas de control de orientación de satélites

Autor: José Ángel Morató Pérez

Tutor: José Manuel Quero Reboul

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Gracias a mi familia por estar siempre en primera línea, por preocuparse por mi futuro y por alegrarse por cada objetivo superado.

A mi tutor José Manuel por confiar en mí y brindarme la oportunidad de formar parte de un gran equipo humano y profesional.

No quiero dejar sin mencionar a Manolo, un gran ingeniero y una persona con la que da gusto trabajar. Gracias por guiarme en este proyecto.

En este proyecto llevamos a cabo el estudio, diseño y fabricación de un sensor solar de muy alta precisión basado en una cámara oscura, capaz de determinar la posición relativa sol-satélite.

La luz del sol entra al sensor a través de un sistema óptico, cuyo campo de visión es de 160° , en el que se encuentra el pinhole por el que pasa la luz. Tras la óptica, se encuentra la cámara de alta resolución cuyos píxeles se iluminan. El sistema está controlado por una FPGA (dentro de la cual se simula un microcontrolador) en la que se encuentran implementados los algoritmos capaces de determinar la orientación del sol en función de los píxeles que se han iluminado más, con un cálculo previo del centroide del sol.

Abstract

In this project we have performed the study, design and manufacturing of a solar sensor with very high accuracy based on a camera obscura, which is able to determine the relative position Sun-satellite.

Sunlight enters the sensor through an optical system, whose field of view is 160° , where is the pinhole through which the light passes. Behind the optical system, the high resolution camera, whose pixels are illuminated, is located. The system is controlled by a FPGA (with a microcontroller simulated) where are implemented the algorithms which are able to determine the Sun orientation according to the most illuminated pixels, with a previous calculus of Sun centroid.

Índice

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xx
1 introducción	1
1.1 <i>Estado del Arte</i>	2
2 Diseño de la mecánica	11
2.1 <i>Pestañas de sujeción</i>	11
2.1 <i>Acople de la óptica</i>	12
2.1.1 <i>Disposición de los elementos de la óptica</i>	13
2.1.2 <i>Pieza de sujeción superior del filtro</i>	16
2.1.3 <i>Juntas</i>	18
2.2 <i>Pinhole</i>	19
2.3 <i>Acabado</i>	19
2.4 <i>Montaje en 3D</i>	20
3 Análisis óptico	23
3.1 <i>Componentes</i>	23
3.2 <i>Cálculos ópticos</i>	25
3.3 <i>Estudio de la relación entre pixel y ángulo de salida</i>	31
3.4 <i>Precisión</i>	34
4 Hardware	39
4.1 <i>Cámara</i>	39
4.2 <i>Reguladores de tensión</i>	41
4.3 <i>FPGA</i>	42
5 Software	43
5.1 <i>Descripción general</i>	43
5.1.1 <i>FPGA</i>	43
5.1.2 <i>Microprocesador</i>	43
5.1.3 <i>Máquina de estados</i>	44
5.2 <i>Parámetros</i>	45
5.3 <i>Interfaz de pruebas</i>	45

6	Calibrado y ensayos	48
6.1	<i>Diseño del bracket</i>	48
6.2	<i>Adaptador para pruebas</i>	52
6.3	<i>Análisis óptico del equipo de pruebas</i>	57
6.4	<i>Ensayos</i>	63
6.4.1	Pruebas y resultados	67
7	Conclusiones	75
8	Apéndice A: planos	76
	Bibliografía	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cálculo de x para distintos espesores de gap.	29
Tabla 2 Resultados con filtro de 25,5 mm de diámetro.	30
Tabla 3 Precisiones en la zona de comportamiento lineal	36
Tabla 4 Valores de FV y LV	40
Tabla 5 Prueba en (0,0)	68
Tabla 6 Pruebas	70
Tabla 7 Comparación ángulos y error absoluto	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de bloques UFSS.....	1
Figura 1.2 Esquema de un sensor CCD	2
Figura 1.3 Sensor CCD	2
Figura 1.4 Esquema sensor CMOS.....	3
Figura 1.5 Diseño anterior al UFSS	4
Figura 2.1 Pestañas de sujeción	12
Figura 2.2 Primer paso del diseño de la óptica. Eliminación de la óptica anterior.	12
Figura 2.3 Interior del sensor. Elementos de la óptica en contacto.	13
Figura 2.4 Relaciones de los requisitos a cumplir.....	14
Figura 2.5 Sujeción inferior del filtro neutro	15
Figura 2.6 Interior de la mecánica. Adaptación para la electrónica.	16
Figura 2.7 Pieza de sujeción superior del filtro.....	17
Figura 2.8 Pieza de sujeción montada.....	18
Figura 2.9 UFSS en PLA.....	20
Figura 2.10 UFSS en PA12	21
Figura 3.1 Coverglass	23
Figura 3.2 Tapa lateral.....	24
Figura 3.3 Filtro de densidad neutra	25
Figura 3.4 Refracción de la luz.....	26
Figura 3.5 Esquema del cálculo óptico (1).....	26

Figura 3.6 Esquema del cálculo óptico (2).....	28
Figura 3.7 Esquema de la influencia en la óptica de la pieza superior (x es la longitud en mm de la zona de la pieza de sujeción superior que pisa directamente al filtro)	29
Figura 3.8 Esquema para el cálculo de la altura crítica.	31
Figura 3.9 Análisis óptico coverglass.....	32
Figura 3.10 Gráfica de la proyección de θ_1 en el eje x.	34
Figura 3.11 Precisiones absolutas del cálculo teórico del sensor.	35
Figura 3.12 Zoom de la gráfica de precisiones.	36
Figura 3.13 Accuracy VS Precision.....	37
Figura 4.1 Diagrama de bloques de la cámara	39
Figura 4.2 Configuración típica de la cámara	40
Figura 4.3 Configuración LDO 1.8V	41
Figura 4.4 Diagrama de bloques SmartFusion2 SoC (imagen extraída de la web de Digikey).....	42
Figura 5.1 Máquina de estados.....	44
Figura 5.2 Panel de pruebas.....	46
Figura 6.1 Bracket FDSS	48
Figura 6.2 Nervios UFSS bracket	49
Figura 6.3 Tope horizontal bracket	50
Figura 6.4 Base bracket UFSS	51
Figura 6.5 Parte trasera bracket UFSS.....	51
Figura 6.6 UFSS calibration bracket	52
Figura 6.7 Agujero pasante adaptador	54
Figura 6.8 Junta filtro-coverglass	54
Figura 6.9 Pestaña de sujeción inferior del coverglass.....	55
Figura 6.10 Junta cuadrada coverglass	55
Figura 6.11 Huecos de extracción en el adaptador	56
Figura 6.12 Parte superior del adaptador	56
Figura 6.13 Parte inferior del adaptador	57
Figura 6.14 Adaptador en el sensor	57
Figura 6.15 Esquema óptico del prototipo.....	58
Figura 6.16 Gráficas de $f(\theta_1, R)$ para distintos valores de R	61
Figura 6.17 Raíz de la función para R=5 mm	62
Figura 6.18 Foto al sol	63
Figura 6.19 Foto en simulador solar.....	64
Figura 6.21 Esquema explicativo de la zona oscura	65

Figura 6.22 Foto trasera simulador	66
Figura 6.23 Foto delantera simulador	67
Figura 6.24 Sistema de referencia	68
Figura 6.25 Promedio coordenada x	71
Figura 6.26 Promedio coordenada y	71
Figura 6.207 Código de implementación del análisis óptico	73

Notación

ADC	Analog Digital Converter
<u>AKE</u>	Absolute knowledge error
<u>APE</u>	Absolute performance error
CCD	Charge Couple Device
FDSS	Fine Digital Sun Sensor
FOV	Field Of View
FPGA	Field Of ViewField-Programmable Gate Array
MKE	Mean knowledge error
MPE	Mean performance error
MSS	Microcontroller subsystem
PCB	Printed Circuit Board
PDE	Performance drift error
PRE	Performance reproducibility error
RKE	Relative knowledge error
RPE	Relative performance error
SoC	System on a chip

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se va a llevar a cabo el rediseño de un sensor solar de la empresa SolarMEMS Technologies, el **Ultra Fine Sun Sensor (UFSS)**.

En primer lugar, definamos qué es el UFSS. Se trata de un sensor, pensado para satélites, que capta la luz del sol y mediante una serie de algoritmos da como salida los ángulos de posición del sol. Esta información es muy importante ya que con ella podríamos por ejemplo orientar el satélite convenientemente o variar la inclinación de los paneles fotovoltaicos que lo alimentan para aprovechar la energía de manera óptima.

Para hacer esta tarea, el sensor tiene tres partes fundamentales. La primera es la **mecánica**, que debe estar pensada para cumplir los requerimientos espaciales. Debe ser capaz de soportar tanto las condiciones del espacio en órbita como las condiciones de lanzamiento. Otra parte clave es la **óptica**. En el UFSS, el sistema óptico está basado en el funcionamiento de una cámara oscura cuyo elemento principal, por el que entra la luz, es un diminuto agujero conocido como pinhole. La óptica debe estar diseñada pensando siempre en el campo de visión (FOV) objetivo. Por último, está la parte **electrónica** basada en el sensor de imagen digital CMOS MT9P031. Este sensor de alta resolución es el encargado de convertir la luz en energía eléctrica. Para controlarlo y hacer los cálculos necesarios para determinar los ángulos, el UFSS está provisto de dos placas de circuito impreso (PCBs) cuyo principal elemento es una FPGA SmartFusion2.

Este proyecto tiene como base un trabajo anterior en el que se hizo el diseño del FDSS, del cual se ha hecho un rediseño completo de la mecánica y del sistema óptico. La electrónica y el software para el cálculo de centroides y el manejo de la cámara son del Star Tracker desarrollado por la empresa SolarMEMS Technologies. Con el nuevo diseño de la mecánica y de la óptica se han hecho varias pruebas de funcionalidad.

Como es habitual, para conseguir una solución que se acerque lo máximo posible a todos los objetivos de diseño, se realiza un proceso iterativo para diseñar cada una de las partes.

Con el UFSS se busca un **FOV** que alcance los **160°**, de esta forma con menos sensores (dependiendo del satélite puede que con solo 2 sea suficiente) se abarca prácticamente la esfera completa del satélite reduciendo así los costes. Además, el empleo del sensor de imagen de alta resolución se justifica con la **precisión** objetivo de **0,01°**.

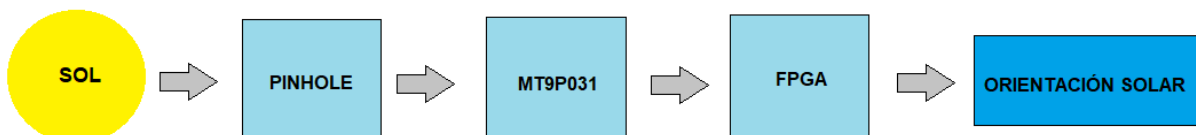


Figura 1.1 Diagrama de bloques UFSS

1.1 Estado del Arte

Si nos referimos a los sensores de imagen, encontramos dos tipos: los CCDs y los CMOS.

Los sensores CCDs fueron los más usados hasta principios del siglo XXI. Su funcionamiento consistía en una matriz de fotodiodos que al recibir luz generaba carga eléctrica. La carga se transfería píxel a píxel en los registros de desplazamiento vertical para después pasar cada fila al registro horizontal. Finalmente, estaba la etapa amplificadora y el convertor que generaba la salida digital.

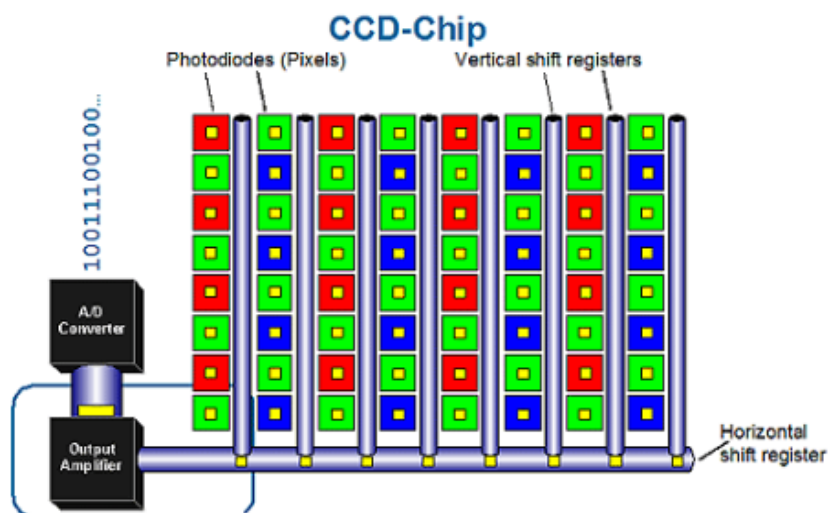


Figura 1.2 Esquema de un sensor CCD

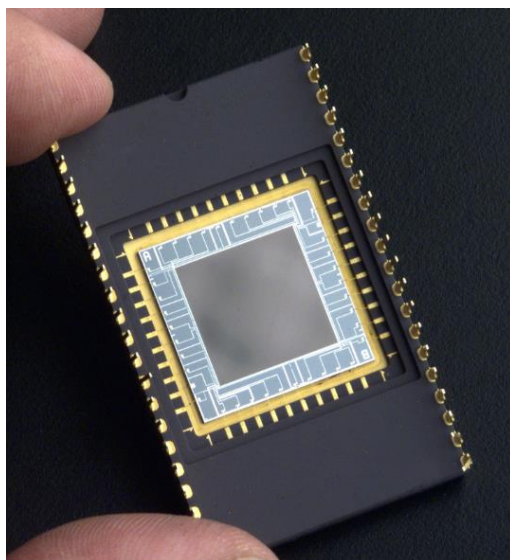


Figura 1.3 Sensor CCD

Poco a poco, el deseo de miniaturización y el desarrollo de la tecnología hicieron que se implantasen los sensores de píxeles activos, más conocidos como sensores CMOS. En este tipo de sensores, la etapa amplificadora va dentro de cada píxel, quedando fuera solo el convertidor analógico-digital. Esto tiene el inconveniente de que parte del píxel está tapado con la electrónica,

asunto que se va resolviendo con la disminución de tamaño de los componentes.

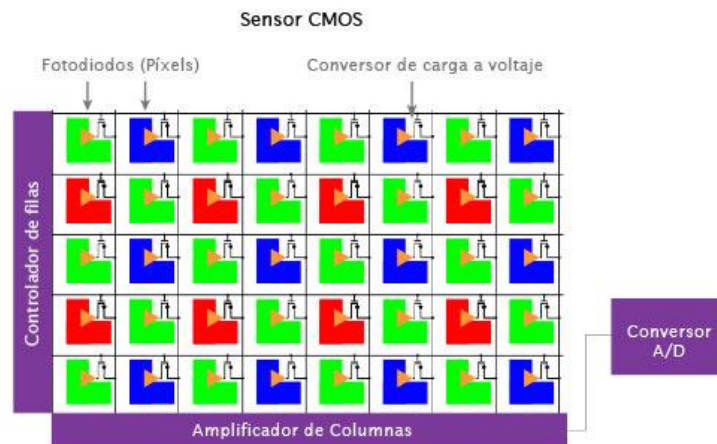


Figura 1.4 Esquema sensor CMOS

En los sistemas de guiado, navegación y control (GNC) para el sector aeroespacial hay dos aspectos fundamentales: el tamaño y la precisión.

El tamaño de los sensores de SolarMEMS Technologies es del orden de decenas de milímetros. El tamaño reducido junto con los materiales seleccionados, hacen que el peso de los equipos sea pequeño, lo cual es crucial cuando hablamos de satélites.

La precisión de los sensores debe ser tan buena como sea posible. En este tipo de sistemas, cuya finalidad es medir ángulos, la precisión ronda las décimas y centésimas de grado, llegando a las milésimas de grado en algunos modelos.

El diseño del UFSS parte de un dispositivo anterior en el que la precisión era de unos $0,03^\circ$ con un FOV de 120° . Por otro lado, está el Star Tracker un sensor que se está desarrollando en la empresa cuya precisión es del orden de $0,001^\circ$. Éste es un equipo más complejo, que determina la orientación en función de la posición de varias estrellas.

El UFSS se encuentra entre ambos, llegando a una precisión de $0,01^\circ$ con un FOV de 160° . Con esto conseguimos un equipo fino con un diseño menos complejo que permite un precio más comedido.



Figura 1.5 Diseño anterior al UFSS

2 DISEÑO DE LA MECÁNICA

En este apartado vamos a exponer las decisiones que hemos tomado en cuanto al rediseño de la mecánica de nuestro sensor. Como ya hemos comentado anteriormente, se trata de un proceso iterativo en el que tenemos varios requisitos a cumplir y en el que pretendemos lograr una solución que respete el máximo de ellos.

Estos objetivos van muy ligados a la óptica, apartado que trataremos detenidamente en el siguiente capítulo. Además, la mecánica debe garantizar la robustez suficiente para que el dispositivo aguante las vibraciones del lanzamiento, las condiciones de presión y temperatura, etc.

A partir del diseño mostrado en la Figura 1.5 vamos rediseñando, teniendo en cuenta que la óptica será completamente distinta y buscando, además, mayor resistencia mecánica.

2.1. Pestañas de sujeción

Es muy importante detenerse en el estudio de las pestañas que unen el UFSS con el satélite ya que son puntos de mucho estrés mecánico y cualquier fallo puede hacer que el equipo salga despedido o que se produzcan vibraciones que alteren su funcionamiento.

En primer lugar, dimensionamos el agujero por el que pasará el tornillo. Para saber qué diámetro debe tener, primero hay que conocer qué tipo de tornillo y qué arandela se van a usar. En este caso, el tornillo que vamos a usar es **M4 DIN912** junto con una **arandela aet** especial para este tipo de tornillos. Con este montaje, concluimos que con un diámetro del agujero de **4,35mm** sería suficiente, ya que el diámetro de rosca es de 4mm y el diámetro interno mínimo de la arandela es de 4,3mm.

Por otro lado, para conseguir mayor resistencia mecánica, se han hecho cambios en posición y forma. En cuanto a la posición, se ha modificado la de las pestañas de la cara superior, llevándolas a los extremos laterales de la misma cara, para lo cual se ha eliminado el fillet dejando un contorno rectangular. Estas posiciones son más seguras que posiciones más centradas. Además, se ha aumentado el espesor de la pestaña hasta los 3 mm. Por último, para eliminar puntos débiles por los que podría sufrir mecánicamente, se ha optado por una paredes laterales para las pestañas de forma arqueada. Con esto, evitamos el punto débil que surge al unir el plano inclinado con la mecánica.

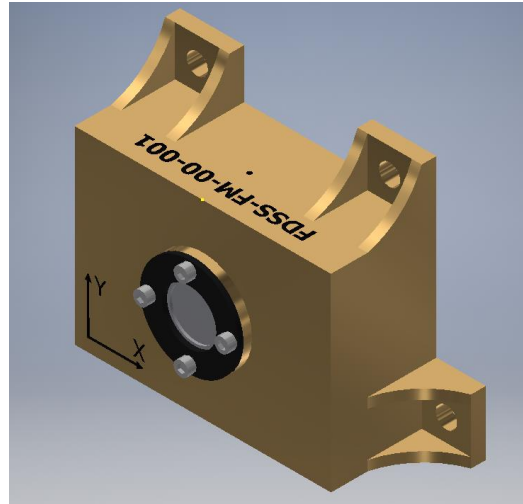


Figura 2.1 Pestañas de sujeción

A parte de los cambios comentados, en la imagen se aprecia el marcado de referencia con los ejes xy y el nombre del modelo anterior, cosa que cambiaremos más adelante.

2.1 Acople de la óptica

El sistema óptico del UFSS lo estudiaremos con detenimiento en el siguiente capítulo, sin embargo, su diseño y el de la mecánica están muy conectados, por lo que hay que hablar de él en este capítulo. Las diferencias con el FDSS (modelo antiguo) son más que notables, tanto es así que lo primero que hemos hecho ha sido eliminar todos los elementos y hacer un hueco con la idea de ir montando el nuevo sistema desde el propio sensor.

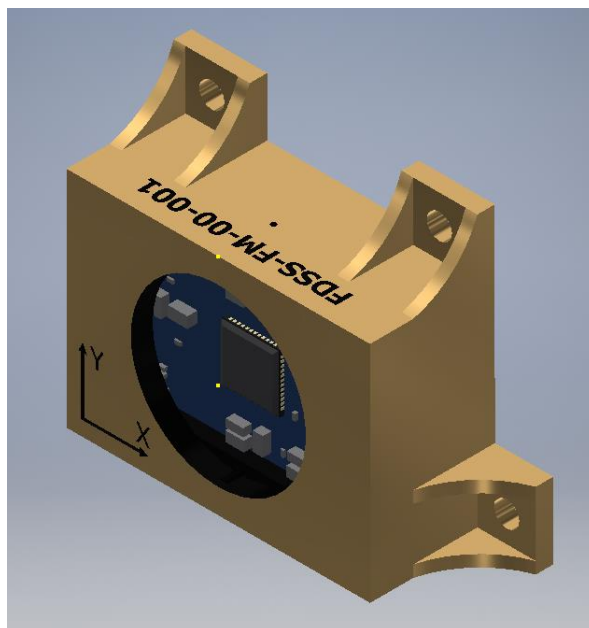


Figura 2.2 Primer paso del diseño de la óptica. Eliminación de la óptica anterior.

La óptica está formada por el sensor de imagen MT9P031, un coverglass donde está el pinhole y un filtro, componentes ordenados de interior a exterior. Con estos elementos tenemos que garantizar un FOV de 160°.

2.1.1 Disposición de los elementos de la óptica

Al tener un campo de visión tan amplio la principal idea es que el filtro neutro quede alineado con la cara externa de la mecánica. Esta decisión hace también que cualquier haz de luz que entre en el interior del sensor tenga ya cierta atenuación, lo cual es deseable porque la electrónica es sensible a la radiación.

Otro asunto a tener en cuenta es el fenómeno straylight, que hace referencia a los rayos que entran al sensor por sitios en los que no está pensado que entre luz. Esto hace que la imagen se altere dificultando la detección del sol y pudiendo hacer que los pixeles saturen.

Con todo esto, el primer estudio se ha hecho con **filtro, coverglass y cámara en contacto entre sí**, pegados. Con esta configuración el filtro no llega a la superficie exterior de la mecánica. Para que esto sea así, habría que bajar la mecánica 2,6 mm. Esta solución no es viable, porque la distancia entre PCB e interior de la mecánica es de 2,5mm, por lo que chocarían. Como remedio a este problema, pensamos en disminuir el espesor pero esto tiene su limitación porque a menor espesor menor robustez. El espesor mínimo pensado es de 2mm. Además existe otra complicación relacionada con los componentes de la PCB. El componente más restrictivo mide 1,73mm de altura, además hay que dejar un espacio de alrededor de 1mm para evitar problemas de radiación y de montaje. Todas estas dificultades hacen imposible que la óptica se monte con todos los elementos pegados entre sí.

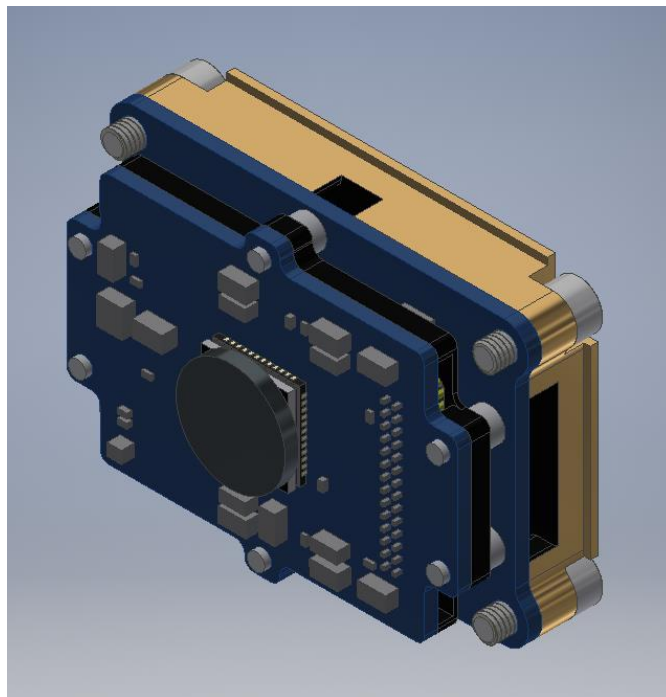


Figura 2.3 Interior del sensor. Elementos de la óptica en contacto.

En la figura 2.3 vemos cómo filtro, coverglass y cámara están en contacto. El filtro es la pieza cilíndrica, el coverglass es cuadrado y está sobre la cámara, que es el chip conectado a la PCB.

La solución pensada a la problemática de bajar la mecánica es la de separar el filtro del coverglass introduciendo un gap. El principal inconveniente de este diseño es que hay que pensar cómo sujetar el filtro, puesto que ya no va pegado al coverglass además de que, al introducir un hueco, es posible que se de straylight.

Para la sujeción del filtro pensamos en unas pestañas de apoyo en la parte inferior donde iría apoyado, más una pieza externa que lo sujete por la parte superior. Estas sujeciones no se pueden hacer de cualquier forma, debemos asegurarnos de que exista un buen apoyo y de que el filtro no contacte con el aluminio porque si es así, la vibración haría que se quebrara.

Tener varios requisitos a cumplir que se relacionan entre sí requiere una mayor organización debido a la complejidad del diseño, además de aumentar el carácter iterativo del proceso.

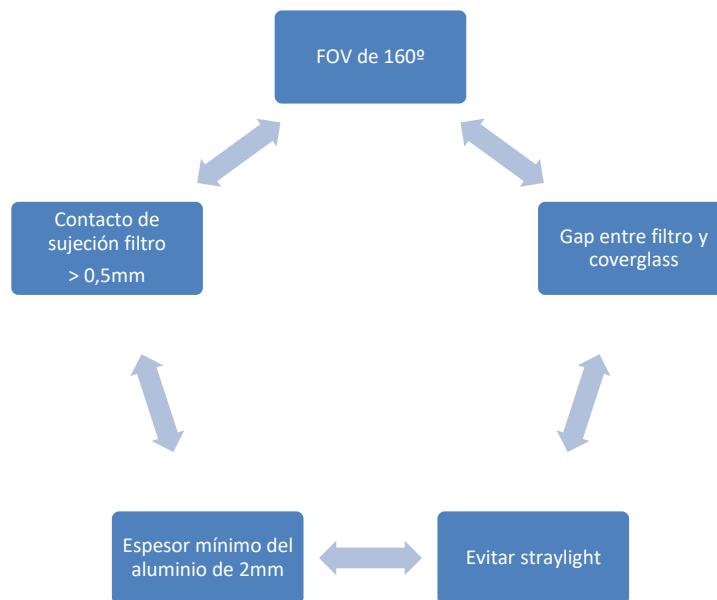


Figura 2.4 Relaciones de los requisitos a cumplir.

La figura 2.4 muestra los 5 elementos fundamentales que hay que tener en cuenta en el proceso de diseño del alojamiento de la óptica.

El proceso iterativo requiere repetir varias veces el análisis óptico de refracciones hasta llegar a la solución esperada. En este capítulo, pasaremos por alto los detalles de este asunto.

El **filtro neutro tiene un diámetro de $12,5 \pm 0,5$ mm** y es circular, mientras que el **coverglass es un cuadrado de 10mm de lado**. La diferencia de forma hay que tenerla en cuenta en la sujeción del filtro ya que las pestañas inferiores pueden chocar con el coverglass.

La primera opción barajada tras los primeros cálculos de refracciones, ha sido un **gap de $450\mu\text{m}$** . Nos encontramos problemas con el montaje del coverglass y las tolerancias de fabricación. Nos vemos obligados a dejar más margen entre el aluminio y el coverglass, porque si el margen es demasiado pequeño, lo más seguro es que en el montaje del cristal, se golpee con el aluminio y lo quiebre. Sin embargo, si queremos aumentar el espacio entre el coverglass y la mecánica, debemos disminuir el tamaño de las pestañas de sujeción. Esto afecta a la dimensión del apoyo, que debe ser la suficiente para ofrecer un buen contacto y que el filtro no sufra. Con el diámetro de filtro que tenemos, si disminuimos el tamaño de la sujeción podemos tener un apoyo insuficiente, por lo que este diseño no parece ser el adecuado.

La solución de estos problemas pasa por elegir otro filtro neutro. **Edmund Optics nos ofrece un filtro del doble de diámetro: $25 \pm 0,5$ mm.** Al elegir un filtro de mayor diámetro tenemos varias ventajas. La primera es que aumentamos el área de contacto con las pestañas de apoyo inferior. Además, al tener mayor apoyo, podemos permitirnos aumentar el gap, lo cual interesa para poder incrementar el espesor de la mecánica y dar mayor margen a la electrónica.

Finalmente, tras el estudio óptico correspondiente, se ha decidido por un **gap de 1mm** que nos deja un **espesor de la mecánica de 3,25mm**. Para dar mayor margen a la electrónica, se han hecho unos huecos en el interior de la mecánica que permite que los componentes electrónicos de mayor tamaño tengan espacio suficiente. Con esta adaptación, nos encontramos en la pestaña de sujeción del filtro el **espesor mínimo de 0,8mm**. Esto puede parecer insuficiente, pero para aumentar esta dimensión tendríamos que subir el gap, lo cual haría que el contacto de sujeción fuese menor, ya que al aumentar el gap se debe tapar menos zona del filtro para conseguir el FOV esperado. Confiamos en el espesor dado y lo evaluamos con ensayos más adelante.

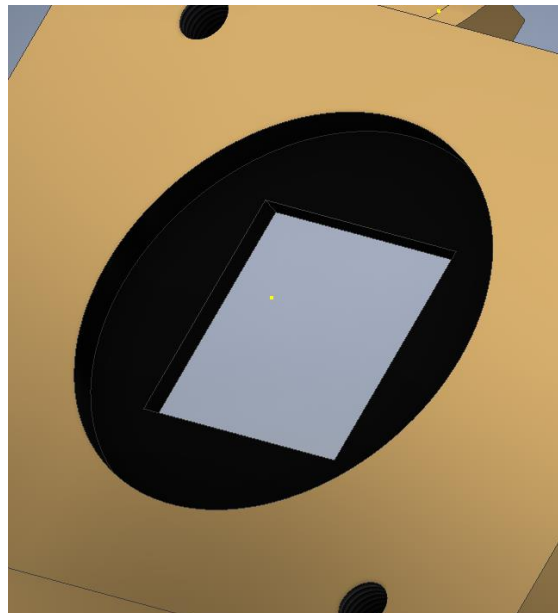


Figura 2.5 Sujeción inferior del filtro neutro

En la figura 2.5 se muestra el acople inferior del filtro. Como se aprecia, respeta la diferencia de formas de los cristales. En el centro se encuentra el hueco para el coverglass con dimensiones de 11x11 mm para evitar los problemas comentados anteriormente de montaje y tolerancias. Por otro lado, el espesor de las pestañas está pensado para asegurar el gap de 1mm. Para ello, hemos tenido en cuenta el espesor de la junta dejando un margen de 0,2 mm tanto abajo como arriba para la pieza de sujeción superior. En cuanto al diámetro, hay que tener en cuenta las tolerancias de fabricación del filtro, las del aluminio y dejar un margen de seguridad. El diámetro final elegido es de 25,9 mm, que deja un margen de 0,2mm en toda la circunferencia para el diámetro máximo de 25,5mm del filtro.

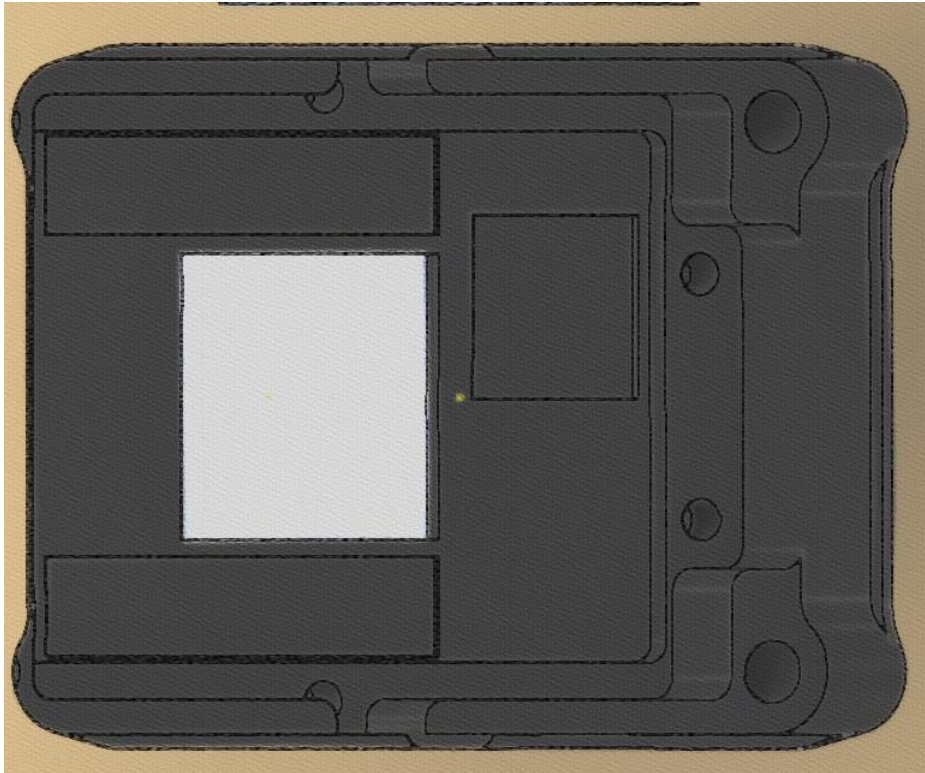


Figura 2.6 Interior de la mecánica. Adaptación para la electrónica.

2.1.2 Pieza de sujeción superior del filtro

Como ya hemos mencionado, el filtro va apoyado por la parte inferior a las pestañas de la mecánica y por la parte superior en una pieza adicional.

Esta pieza tiene un diseño especial ya que, como es previsible, afecta a varios de los asuntos que aparecen en la figura 2.4.

Hay que prestarle especial atención al FOV porque, al ser una pieza que va sobre el propio filtro, tapaná parte de la zona de entrada de la luz. Esto está estrechamente relacionado con hasta dónde puede entrar la pieza en la zona del filtro. Respecto a esto último, intentamos que pise lo máximo posible al filtro para tener un mayor área de sujeción. La longitud que puede entrar en la zona del filtro depende del gap y de la forma que tenga la pieza, además del FOV. Estos cálculos se detallarán en el capítulo siguiente.

Por otro lado, la sujeción de la pieza al resto de la mecánica es otro asunto clave. La opción que se ha tenido en cuenta es el atornillado, ya que ofrece mayor seguridad que el uso de un pegamento. Usar tornillos tiene algunos inconvenientes. El principal es que hay que pensar en cómo se alojarán estos para que no afecte al FOV. Al tener un campo de visión tan amplio, cualquier elemento de los alrededores del filtro puede hacer sombra. Además, como la pieza debe ser muy fina por lo mismo, los tornillos deben ser pequeños para que no atraviesen el espesor. Los tornillos que vamos a usar son **M2x3 ISO7045**. La elección del tornillo no es aleatoria. Pensamos en usar tornillos M2 o M3. Para decidir, se ha hecho un cálculo aproximado de la masa de la pieza, usando la densidad del aluminio y un volumen aproximado. El resultado es que la pieza no llega a

los 2g de masa, ya que es bastante fina. Al ser tan poca masa, no hace falta usar tornillos M3.

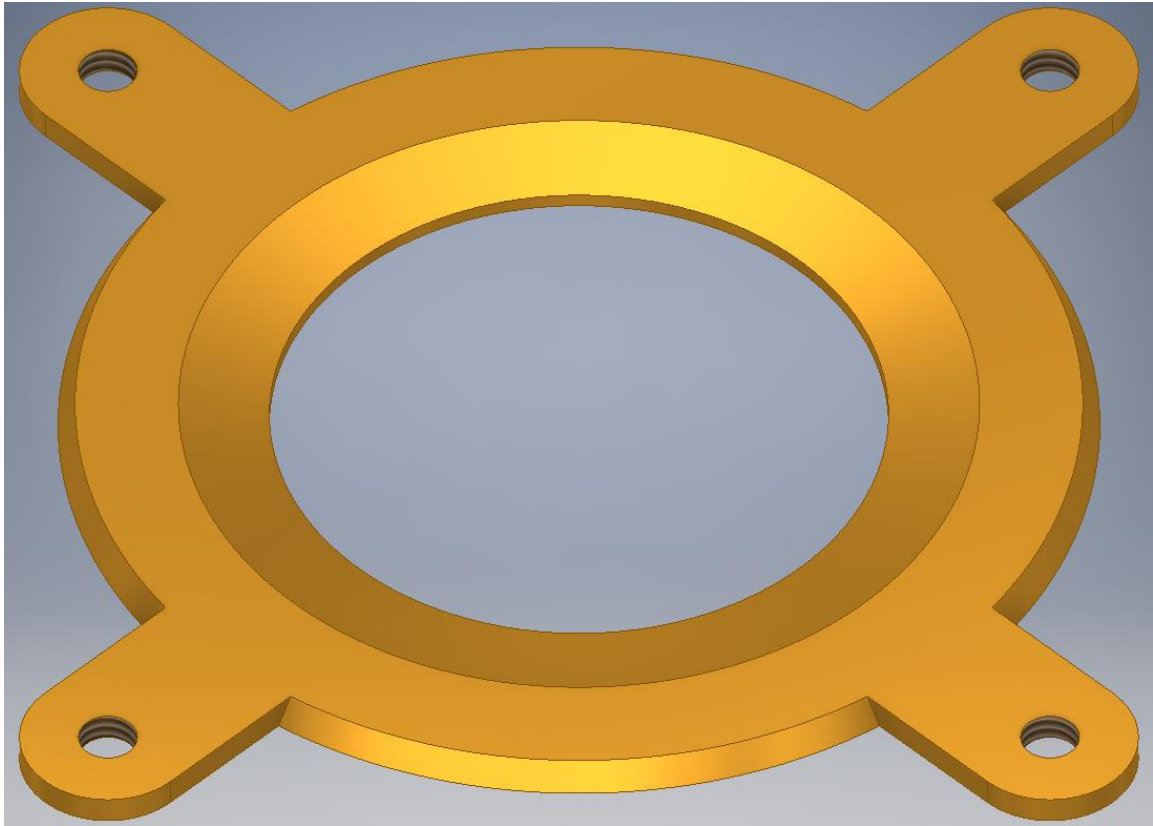


Figura 2.7 Pieza de sujeción superior del filtro.

En la figura 2.7 vemos el diseño final de la pieza. El espesor final es de 1mm. El alojamiento de los tornillos son las cuatro pestañas, decisión que se ha tomado por dos motivos. El primero es alejar el tornillo del filtro para evitar que la cabeza entre dentro del FOV. El segundo es llevar los tornillos más cerca del contorno, donde hay un espesor mayor de aluminio para poder hacer la rosca.

Por otro lado, la pendiente interior de la pieza está pensada para respetar el FOV de 160°, dejando un ángulo final de la cara de 9,2° que, al ser menor de 10°, no afecta al campo de visión.

Para el espesor de la zona interna, tenemos que prestar atención a las dificultades de fabricación. Un espesor demasiado pequeño hará que la pieza se fracture fácilmente o que directamente no pueda ser fabricada. En nuestro caso, el espesor mínimo que barajamos fue de 0,3 mm, ya que anteriormente se habían hecho diseños con este espesor en SolarMEMS. Sin embargo, el espesor final es de 0,5mm, para dar más seguridad. No hace falta decir que este espesor afecta directamente al FOV ya que a mayor espesor, mayor será la sombra sobre el filtro.

Con todo esto, ya se puede ver cuál es el diámetro interno de la pieza. Los cálculos ópticos justifican que un diámetro de 21 mm ofrece un área de contacto con el filtro suficiente además de no ser intrusiva.

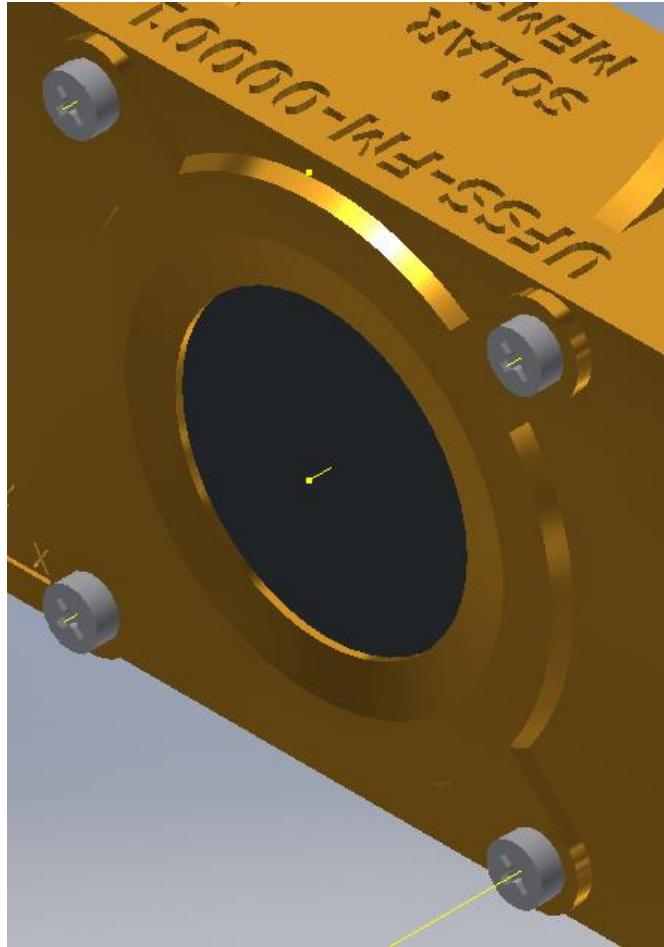


Figura 2.8 Pieza de sujeción montada.

2.1.3 Juntas

Ya hemos visto que el filtro se apoyará tanto por la parte inferior a las pestañas como por la parte superior a la pieza de sujeción. No obstante, el cristal no puede estar en contacto directo con la carcasa metálica porque las fuertes vibraciones a las que se verá sometido el sensor, harán que el filtro golpee a la mecánica y se quiebre.

Por lo tanto, para solucionar este problema debemos poner una capa intermedia que sirva para fijar mejor el filtro y amortiguar los impactos debidos a las vibraciones. En este punto tenemos dos ideas importantes, la primera es el uso de algún pegamento y la segunda es utilizar unas juntas.

Es muy probable que el UFSS final utilice pegamento ya que ofrece mayor fijación y un mejor comportamiento en vuelo. Sin embargo, no se puede utilizar cualquier pegamento, hay que pensar bien cuál es el idóneo para esta función por motivos de seguridad estructural, transferencia térmica, etc. Entonces, como para poder utilizar pegamento es necesario hacer este estudio nos decantamos por la opción de las juntas para este primer prototipo.

Hemos elegido esta opción porque es mucho más simple y para nuestro prototipo es útil. Además, como el material usado será teflón, que es un material polimérico barato, las juntas son más atractivas económicamente hablando.

Para su diseño vuelve a ser importante considerar la tolerancia del aluminio así como la de la propia junta. En nuestro caso, dejamos un margen entre el contorno de la junta y el hueco circular

de la mecánica de 0,2 mm; y no consideramos ningún margen en espesor, suponiendo que el acople entre la mecánica, el filtro neutro y las juntas es perfecto.

Por último, el ancho de la junta debe ser el suficiente para asegurar un buen apoyo pero con cuidado de no afectar al FOV.

2.2 Pinhole

El pinhole es el elemento más característico de una cámara oscura. Se trata de un pequeño agujero por donde pasa el haz de luz que posteriormente se lee en el sensor. En el UFSS podríamos pensar por qué utilizamos este tipo de tecnología y no usamos un sistema de lentes, como en el Star Tracker por ejemplo. El motivo principal es evitar la saturación de los píxeles del MT9P031. Si la cámara saturase, se vería una mancha blanca donde sería imposible distinguir la posición del sol. Además, el diseño es mucho más simple y se evitan costes, reduciendo el precio del equipo.

En el FDSS, el pinhole era de 25 μ m de diámetro construido en una lámina de aluminio. Esta forma no era buena por distintos motivos. El primero es que la metodología de fabricación no permitía hacer un pinhole más pequeño. Además, el acabado no era perfecto ya que los bordes del pinhole no eran rectos, introduciendo esquinas finas que terminaban rompiéndose. Esto causaba distorsiones que tenían como efecto final que el sol no se viese con una forma elíptica, sino con forma irregular. Calcular el centro de una forma irregular es mucho más complicado, por lo que la precisión del sensor se veía afectada.

En el caso del UFSS el pinhole se fabrica de una forma más fina y fiable. Se deposita una **capa de aluminio de 200nm** de espesor en la superficie superior del coverglass que va pegado a la cámara. Esta capa es la que alberga el pinhole que, en este caso, es de **100 μ m de diámetro**. Con esta solución se evitan los problemas comentados anteriormente, permitiendo una mayor precisión. El diámetro final del pinhole dependerá de los resultados obtenidos de las pruebas con distintos tamaños.

2.3 Acabado

El UFSS está pensado para trabajar en el espacio, donde las condiciones son extremas. Debemos tratar que el sensor se caliente lo menos posible. Para esto, no podemos contar con la refrigeración por convección con el aire, ya que estamos en vacío. Por lo tanto, debemos transferir el calor por conducción o interviniendo en la radiación.

La principal fuente de calor para nuestro equipo es la radiación recibida del sol. Entonces, si reducimos el efecto de la radiación, conseguimos que la temperatura no se dispare. La forma más eficaz es intentar que el sensor absorba la menor cantidad de radiación posible.

Para conseguir este objetivo, en el **exterior de la mecánica** del UFSS se realiza un tratamiento de **anodizado de aluminio sin tinte**. Este acabado es el elegido porque al no tener tinte, la luz del sol no lo degradará y conseguiremos un buen comportamiento de reflexión. Además, con esto también conseguimos que la carcasa no sea conductora, lo cual evita posibles cortocircuitos con los cables y piezas del propio satélite.

Otro aspecto vital en el diseño del sensor es evitar la saturación de la cámara. Para ello, en aquellas superficies que se pueda reflejar luz hacia la cámara, no podemos usar el mismo acabado

que en el exterior. En este caso tenemos dos opciones, un anodizado con tinte orgánico y uno con tinte inorgánico. Para nuestro prototipo usaremos el **anodizado con tinte orgánico**, que tiene un comportamiento ante reflexión peor que el del tinte inorgánico pero que nos sirve para este prototipo.

Es interesante también mencionar el **vantablack**, que es una sustancia, formada por una estructura de nanotubos de carbono, capaz de absorber el 99,965% de la luz visible que le llega.

También habrá zonas en las que no se haga ningún tipo de tratamiento como pueden ser los alojamientos de los tornillos y las partes en las que la luz no incidirá, dejándonos de importar su reflexión.

2.4 Montaje en 3D

Una vez finalizado el diseño, lo fabricamos con una impresora 3D para comprobar que todo encaje como debería. Este paso es importante porque sirve para detectar posibles errores antes de la fabricación final de la pieza, lo que ahorraría el coste de fabricación de unidades mal diseñadas.

Se ha hecho un primer modelo en una impresora 3D no profesional, en PLA y con una precisión no muy alta.



Figura 2.9 UFSS en PLA

Viendo que todo encaja bien, se ha hecho un segundo modelo de alta precisión en **PA12** en una empresa que se dedica a este tipo de fabricaciones. La idea de este segundo modelo es acercarnos más a la calidad que conseguimos con la fabricación en aluminio, de forma que nos sirva para realizar algunas pruebas.

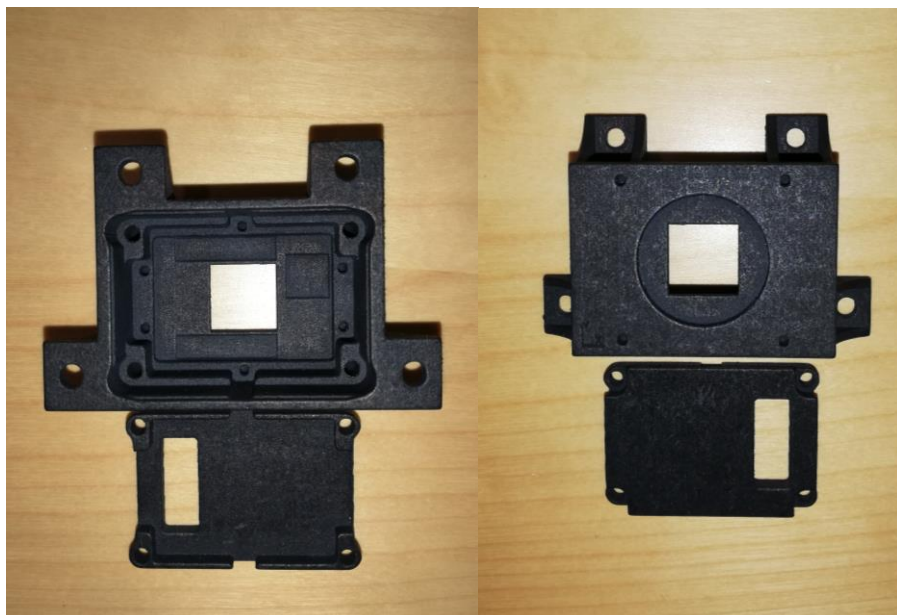


Figura 2.10 UFSS en PA12

3 ANÁLISIS ÓPTICO

En el capítulo anterior hemos comentado aspectos importantes de la óptica del UFSS. En este capítulo entraremos más en detalle en los cálculos realizados en su diseño.

3.1 Componentes

A modo de recordatorio, los componentes de la óptica son la pieza de sujeción superior del filtro neutro, el propio filtro, el coverglass en cuya cara superior se encuentra el pinhole y, por último, el sensor MT9P031.

Si analizamos los componentes desde la PCB hacia el exterior de la mecánica, en primer lugar, nos encontramos el sensor de imagen **MT9P031**, basado en tecnología CMOS. Dispone de una matriz activa de pixeles de 2592x1944, con un tamaño por píxel de 2,2x2,2 μ m. Con esta cantidad de pixeles y la **resolución de 12 bits** del convertidor **ADC** tenemos la capacidad de aumentar bastante la precisión del equipo.

Arriba nos encontramos un **coverglass de borosilicato** cuya principal función es la protección de la cámara. Este cristal es un cuadrado de 10x10mm con un espesor de 0,8mm y va pegado al sensor. Como ya hemos mencionado antes, en la cara superior se encuentra el pinhole.

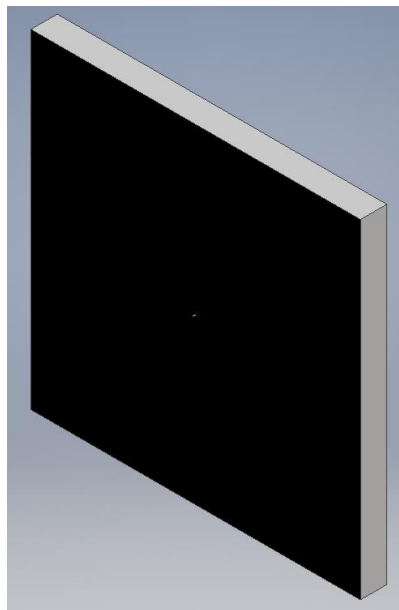


Figura 3.1 Coverglass

En la figura 3.1 se puede ver representada la capa superior de aluminio donde está el **pinhole**. Esta capa es completamente opaca, dejando pasar la luz solo por el pinhole. Sin embargo, al ser el cristal de borosilicato completamente transparente, podría ser que entrase luz por la zona lateral. El straylight hay que evitarlo, para ello se ha pensado una solución bastante simple, con la que conseguimos acercarnos mucho a la idea de cámara oscura, que consiste en una pieza que pretende tapar la zona lateral. La pieza va pegada a la PCB, tiene forma cuadrada, como el coverglass, con la misma altura que la superficie superior de este respecto la PCB, de forma que

funciona como una funda que tapa la entrada de luz lateral.

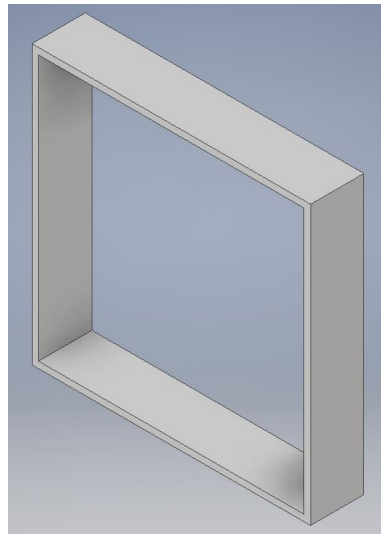


Figura 3.2 Tapa lateral

Por encima del coverglass, tras el gap, está el **filtro de densidad neutra**. Este cristal es fundamental para evitar la saturación. Si dejásemos entrar al UFSS la gran cantidad de luz solar que hay en el espacio, la cámara saturaría y no serviría. Además de su característica atenuadora en el espectro visible (350-750 nm aprox. de longitud de onda), es importante la filtración de infrarrojos y ultravioletas. La radiación infrarroja conviene filtrarla porque produce calor dentro del dispositivo. Este exceso de temperatura hace que en la cámara aparezca corriente de oscuridad, que es un fenómeno que consiste en la aparición de corriente eléctrica en los píxeles que no están recibiendo luz debido a la temperatura. Esto se puede traducir como un ruido añadido que podemos pasar por alto mediante software, el problema viene cuando la intensidad es tan grande que no somos capaces de distinguir el sol del propio ruido. Por otro lado, es interesante la filtración de la banda ultravioleta porque hacen que el coverglass coja un tono amarillento, sobre todo el que viene directamente con el sensor ya que es un cristal de menor calidad. Esto no interesa porque estropea el cristal e introduce una atenuación extra con la que no contamos.

En el catálogo de Edmund Optics nos encontramos varias opciones. En nuestro caso, hemos optado por un filtro circular reflexivo de $25 \pm 0,5$ mm de diámetro y 1,6 mm de espesor. Que sea reflexivo es un detalle importante porque hará que parte de la radiación no la absorba el propio filtro, haciendo que su temperatura no suba demasiado y evitando deformaciones.

Por otro lado, hay distintos modelos de filtros en función del porcentaje de transmisión. Tenemos que llegar a un compromiso entre velocidad de captura y saturación, ya que a menor porcentaje de transmisión menor será la cantidad de luz que dejará pasar el filtro, por lo que se dificultará la saturación. Sin embargo, cuanto menos luz entre en el sensor, mayor deberá ser el tiempo de exposición y, por lo tanto, menor será la velocidad de captura de imágenes. En nuestro caso, necesitamos una velocidad de varias fotos por segundo, evitando la saturación .

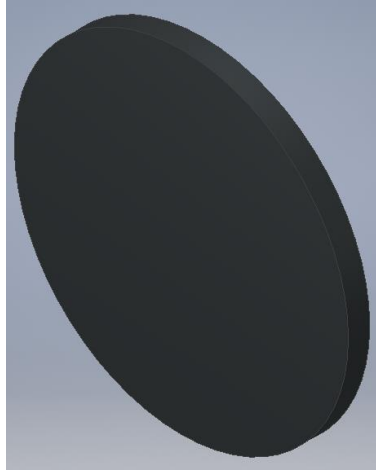


Figura 3.3 Filtro de densidad neutra

En el capítulo anterior ya hemos comentado cómo se sujeta el filtro al resto del equipo, necesitando la pieza de sujeción superior, que es el último componente del sistema óptico.

3.2 Cálculos ópticos

En este apartado se expondrán los cálculos realizados en el proceso de diseño de la óptica del UFSS. Ya hemos hablado del carácter iterativo del proceso, teniendo que repetir varias veces los cálculos hasta llegar a una solución comprometida con los distintos requisitos de diseño.

Para el análisis, será necesario conocer los índices de refracción de nuestros cristales. En nuestro caso, el índice de refracción del filtro neutro (n_F) es 1,52, el del coverglass (n_{CG}) también es 1,52 y finalmente también es importante recordar el del vacío (n_V) que es 1.

Para nuestros cálculos nos centraremos en las refracciones de la luz a medida que va atravesando nuestra óptica, por lo que emplearemos la **Ley de Snell**:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2) \quad (1)$$

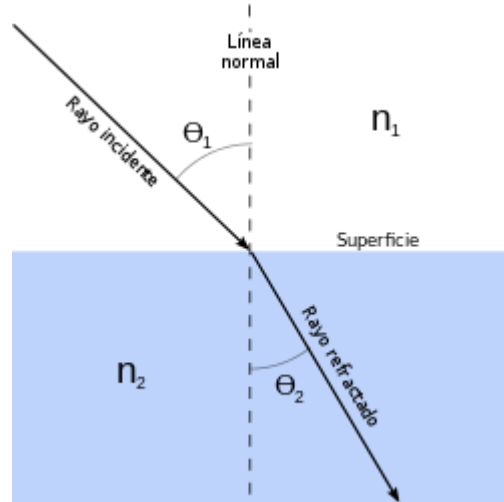


Figura 3.4 Refracción de la luz

Primero, recordamos la posición de los elementos. En un primer momento, como ya se explicó en el anterior capítulo, se pensó en pegar cámara, coverglass y filtro, lo que fue imposible debido a las dificultades mecánicas que suponía el hecho de tener que bajar la mecánica para que el filtro estuviera en el mismo nivel que la superficie exterior.

Decidimos separar el filtro neutro del coverglass añadiendo un gap. El espesor del gap será elegido atendiendo también a las demás variables ópticas, como pueden ser el FOV o la distancia de apoyo en el filtro de la pieza de sujeción superior.

En cuanto al coverglass, tenemos uno de espesor de $800\ \mu\text{m}$ pegado al de la cámara, que tiene un espesor de $400\ \mu\text{m}$. Como los índices de refracción son 1,52 en ambos casos, consideraremos un único cristal de 1,2mm de espesor (e_{CG}).

El primer cálculo realizado ha sido considerando un filtro con diámetro de 12,5 mm. El objetivo es calcular el espesor del gap necesario para que un rayo que entra por el extremo del filtro con un ángulo de 80° respecto a la vertical (FOV de $\pm 80^\circ$) llegue al pinhole.

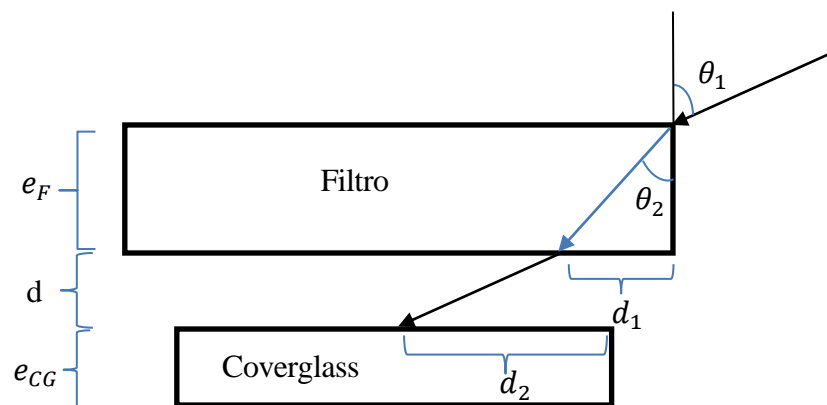


Figura 3.5 Esquema del cálculo óptico (1)

En la figura 3.5 observamos el filtro con espesor e_F , el gap (d) y la unión de los coverglass.

El ángulo del rayo que incide en el filtro será el mismo que el que incide en el coverglass porque el medio, en ambos casos, es el vacío. Al considerar idénticos los índices de refracción de filtro y coverglass, el ángulo dentro de los cristales será el mismo θ_2 .

En primer lugar, calculamos el ángulo θ_2 aplicando la ley de Snell:

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{n_1}{n_2}\text{sen}(\theta_1)\right) \quad (2)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del vacío, que vale 1, n_2 es el del filtro, que para este primer cálculo tomamos 1,49, que es la media de las opciones que teníamos, y el ángulo θ_1 es 80° .

Con estos valores obtenemos un θ_2 de $41,3719^\circ$. Ahora calculamos d_1 :

$$d_1 = e_F \cdot \tan(\theta_2) \quad (3)$$

Tomando como espesor del filtro 1,6 mm, d_1 vale 1,409199 mm. Como el diámetro del filtro es de 12,5 mm, calculamos d_2 como la diferencia entre el radio (6,25 mm) y d_1 , siendo el resultado 4,8408 mm.

Por último, para calcular d , sabemos que el ángulo es 80° , por lo que aplicamos trigonometría:

$$d = \frac{d_2}{\tan(80)} \quad (4)$$

De (4) tenemos que el **espesor del gap** vale aproximadamente **853 μm** . Con estos valores conseguimos un espesor de 3 mm en la mecánica y un espesor mínimo de 2 mm en los rebajes para los componentes electrónicos.

En este cálculo previo, no hemos tenido en cuenta varias cosas. En primer lugar, hemos considerado el diámetro nominal del filtro, pero el fabricante nos aporta también su tolerancia de fabricación, que en este caso es de $\pm 0,5$ mm. Las tolerancias hay que tenerlas en cuenta para hacer los cálculos con las peores condiciones posibles. Además, hemos considerado un índice de refracción aproximado, que con la posterior elección del modelo en concreto debemos modificar. Por último, hemos supuesto que el rayo entra justo por el extremo del filtro, sin tener en cuenta cómo nos afectará la pieza necesaria para sujetarlo por fuera.

Antes de repetir los cálculos, veamos cómo puede afectarnos la **dilatación térmica del filtro**. Finalmente, el filtro elegido ha sido el reflexivo que, además de tener un índice de refracción de 1,52, tiene un coeficiente de dilatación térmica a 20°C de $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Calculamos cuánto se dilata el filtro a una temperatura extrema de 150°C .

$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 12,5\text{mm} \cdot (150^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \approx 20\mu\text{m} \quad (5)$$

Como la dilatación térmica calculada en (5) es mucho menor que el diámetro del filtro despreciamos su efecto en los cálculos.

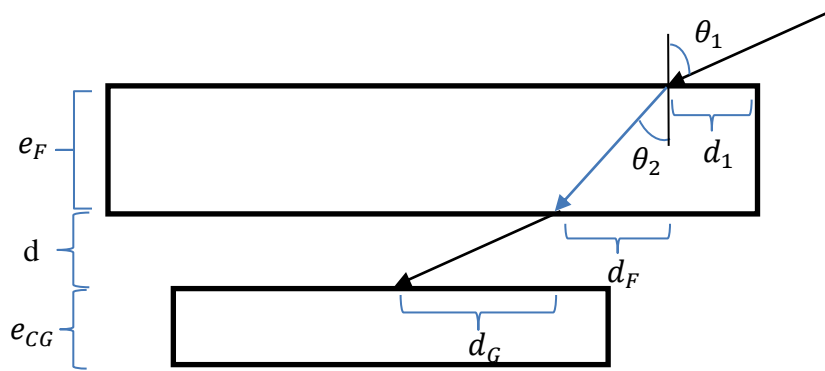


Figura 3.6 Esquema del cálculo óptico (2)

En la figura 3.6 vemos la situación planteada para el segundo cálculo de la óptica. En este caso sí se tiene en cuenta el efecto de la pieza superior, introduciendo la distancia d_1 . También se ha añadido la tolerancia del filtro, teniendo un diámetro máximo de 13 mm.

Volvemos a hacer el mismo cálculo de (2) pero con el índice de refracción del filtro actualizado, 1,52. Con este cálculo obtenemos un θ_2 de $40,383445^\circ$. Con este resultado calculamos d_F igual que en (3) dando 1,360959 mm.

Analizando las distancias horizontales tenemos:

$$d_1 + d_F + d_G = 6,5 \quad (6)$$

Si añadimos el gap:

$$d_G = d \cdot \tan(80) \quad (7)$$

Si juntamos (6) y (7) y sustituimos el valor de d_F :

$$d_1 + d \cdot \tan(80) = 5,139042 \quad (8)$$

De (8) sacamos una conclusión muy importante y es la dependencia de la distancia que puede entrar la pieza de sujeción superior sin afectar al FOV y el espesor del gap. Sin embargo, la distancia que puede entrar la pieza encima del filtro no coincide con d_1 ya que el espesor de esta también provoca sombra que puede afectarnos en el FOV. Por lo tanto, hay que añadir este detalle en los cálculos anteriores para poder analizar bien qué gap necesitamos sin olvidar que necesitamos una buena superficie de sujeción del filtro.

En SolarMEMS se han llegado a utilizar espesores de hasta 0,3 mm. Tomamos esta dimensión como mínima ya que si usamos un espesor menor podemos tener problemas de fabricación, y no podemos permitir que la pieza se quiebre.

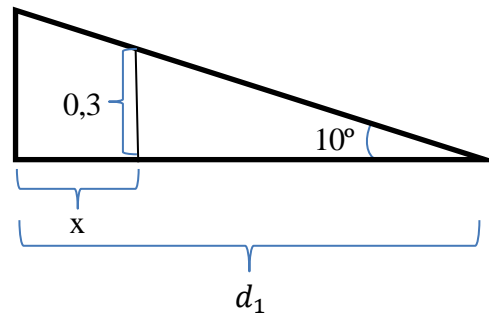


Figura 3.7 Esquema de la influencia en la óptica de la pieza superior (x es la longitud en mm de la zona de la pieza de sujeción superior que pisa directamente al filtro)

Observando la figura 3.7 y aplicando trigonometría obtenemos:

$$x = d_1 - \frac{0,3}{\tan(10)} \quad (9)$$

Por lo tanto, con (9) podemos calcular cuánto puede pisar la pieza superior al filtro sin que afecte al FOV. Como vemos, depende de d_1 y esta a su vez de d , el espesor del gap. Así que la distancia que puede entrar la pieza en la superficie del filtro depende del espesor del gap.

d (μm)	x (mm)
700	< 0
500	0,59 / 0,1
450	0,88 / 0,39
400	1,17 / 0,67

Tabla 1 Cálculo de x para distintos espesores de gap.

En la tabla tenemos los resultados de los cálculos con varios espesores de gap para los filtros con dimensiones extremas, el primero para la tolerancia más positiva (13 mm) y el segundo para la más negativa (12 mm). Cuanto mayor sea la x mejor porque tendremos mayor superficie de contacto entre la pieza de sujeción y el filtro. Por el contrario, la relación entre d y x es inversa, por lo que para aumentar esta dimensión debemos disminuir el gap. Esto trae problemas porque si bajamos el gap, bajamos la mecánica y tenemos que disminuir el espesor. Podemos ver que para obtener un apoyo aceptable tenemos que disminuir bastante el gap, ya que necesitamos que sea de al menos 0,5 mm.

Si atendemos a las pestañas de apoyo inferior, nos encontramos con dificultades. El problema viene con el coverglass, que coincide en altura con las pestañas, por lo que debemos dejar margen suficiente para evitar problemas con la tolerancia del aluminio y con las imprecisiones del montaje. Si el margen no es lo suficientemente grande, podemos hacer que el

aluminio toque el coverglass que, al ser tan frágil, se quebrará. Por el contrario, si disminuimos las pestañas para que el margen sea mayor, el apoyo para el filtro será insuficiente.

Analizando estos inconvenientes, se ha optado por **cambiar el filtro**, eligiéndose el mismo filtro con un diámetro de **25 mm**. Al tener el doble de diámetro, la superficie de apoyo deja de ser un problema porque tenemos mucha área. Además, podemos aumentar el gap, lo que nos dará más facilidades en cuanto al espesor de la mecánica. El inconveniente es que entra más luz al interior del UFSS, aumentando la probabilidad de saturación de la cámara y los posibles problemas de radiación para los componentes electrónicos.

Con el nuevo filtro los cálculos son prácticamente idénticos. Cambiaría la ecuación (6) ya que la suma de distancias dará 12,75 mm (radio máximo del nuevo filtro).

$$d_1 + d_F + d_G = 12,75 \quad (10)$$

Las demás ecuaciones son idénticas, arrojando los siguientes resultados:

d (mm)	x (mm)
1,7	0,04
1,2	2,88
1	4
0,9	4,58

Tabla 2 Resultados con filtro de 25,5 mm de diámetro.

Observando la tabla 2, la opción de **gap de 1 mm** es buena porque tenemos un apoyo de 4 mm que cumple perfectamente con lo requerido y, además, el gap no es tan pequeño, lo que permite que la mecánica no la tengamos que bajar tanto, pudiendo aumentar el espesor.

Recordamos que estos cálculos son suponiendo una pieza de sujeción superior que termine con un espesor de 0,3 mm. Para garantizar que el FOV sea de $\pm 80^\circ$ limpios, hacemos el cálculo de x suponiendo un FOV de $\pm 85^\circ$ y un espesor de 0,5 mm para un gap de 1 mm.

Con la ecuación (9) obtenemos:

- Para un FOV de $\pm 85^\circ$ y un espesor de 0,5 mm: $x = 0,0027$ mm. Apoyo insuficiente.
- Para un FOV de $\pm 85^\circ$ y un espesor de 0,3 mm: $x = 2,28$ mm.
- Para un FOV de $\pm 80^\circ$ y un espesor de 0,5 mm: $x = 2,88$ mm.

Finalmente, como tenemos margen suficiente para el apoyo, hemos decidido que el **espesor** sea de **0,5 mm** para que la pieza sea más robusta. En cuanto al apoyo, el **diámetro final interno de la pieza es 21 mm**, que nos garantiza un apoyo de 2 mm para un filtro de 25 mm. Con esta solución, el FOV teórico supera los 81° .

Si pensamos ahora en cómo puede afectar al campo de visión el resto de la pieza, lo único que puede darnos problemas son los tornillos, ya que sobresalen en altura.

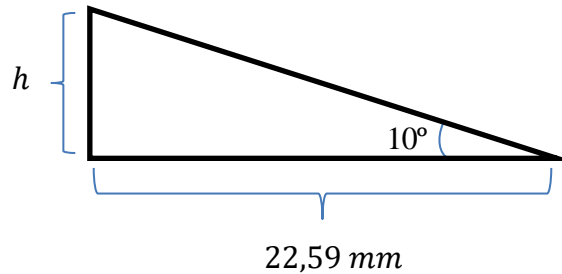


Figura 3.8 Esquema para el cálculo de la altura crítica.

En la figura 3.8, h representa la altura crítica que nos da el FOV de $\pm 80^\circ$ a la distancia en la que se encuentran los tornillos respecto del centro, que es 22,59 mm.

$$h = 22,59 \cdot \tan(10) = 3,98 \text{ mm} \quad (11)$$

La cabeza del tornillo mide 1,6 mm de alto, por lo que:

$$\text{cabeza del tornillo} + \text{espesor pieza} = 1,6 + 1 = 2,6 \text{ mm} < 3,98 \text{ mm} \quad (12)$$

La expresión (12) nos demuestra que **los tornillos no afectan al FOV** para la distancia a la que están alojados porque la suma de la cabeza más el espesor de la pieza es menor que la altura crítica calculada en (11).

Además de los elementos ya mencionados, como el filtro va apoyado a la pieza superior y a las pestañas inferiores, hay que considerar el espesor de las juntas. Esto hará que el filtro no esté en contacto con la pieza superior, por lo que el comportamiento final del sensor no será con exactitud el calculado teóricamente.

3.3 Estudio de la relación entre pixel y ángulo de salida

En este apartado veremos cómo se traduce en cuanto a ángulo solar que un determinado pixel se ilumine.

Cuando la luz entra por el sistema óptico y llega al MT9P031, éste ve una mancha luminosa con forma elíptica, no se ilumina solo un pixel. Por lo tanto, el primer cálculo que hay que hacer es el del centroide de esa forma. Una vez hecho esto, el resto de los cálculos se realizan considerando un solo píxel.

El cálculo de la posición del centroide es muy simple. Se resume en hacer una media ponderada considerando la intensidad luminosa que percibe cada píxel de la cámara.

$$x = \frac{\sum_{i,j} dx(i,j) \cdot I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} \quad (13)$$

$$y = \frac{\sum_{i,j} dy(i,j) \cdot I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} \quad (14)$$

En las ecuaciones (13) y (14) :

x e y son las coordenadas del centroide.

I_{ij} es la intensidad luminosa del pixel (i, j) .

dx y dy son las distancias ortogonales a los ejes x e y .

Una vez definido el cálculo de la posición del centroide, el objetivo es relacionarlo con el ángulo con el que incide la luz al UFSS, de manera que sabiendo qué pixel es el más iluminado seamos capaces de saber el ángulo en el que está el sol.

Para llevar a cabo el análisis usaremos el sistema de **coordenadas esféricas** que nos permite tener que calcular un único ángulo si estudiamos el comportamiento en una proyección sobre un plano radial. Para el ángulo azimutal, bastaría con hacer la tangente y tener cuidado con los signos de las coordenadas.

Otra cosa que podríamos pensar que nos afectaría en este cálculo es que el filtro y el coverglass no tengan exactamente el mismo índice de refracción. Sin embargo, como el gap y el exterior son el mismo medio, el vacío, el ángulo de incidencia en el filtro y en el coverglass es el mismo. Por lo tanto, podemos simplificar el problema y centrarnos en el estudio óptico del coverglass.

Sin embargo, estamos considerando que el coverglass es un único cristal con un espesor de 1,2 mm, cuando la realidad es que son dos cristales pegados, el coverglass externo de 800 μm y el propio de la cámara de 400 μm . Esta consideración se debe a que se supone que son exactamente el mismo material y que no hay refracciones al pasar de uno a otro ya que tienen el mismo índice de refracción. Si esto no se cumpliera, el resultado de los cálculos sería alterado introduciendo un error.

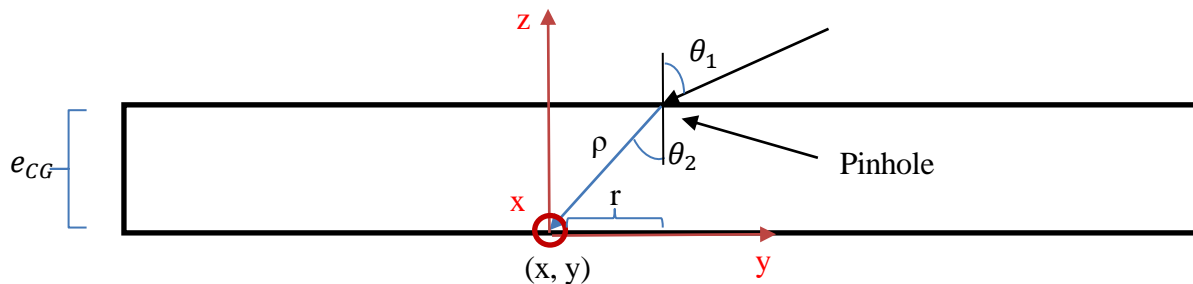


Figura 3.9 Análisis óptico coverglass.

Analizando la figura 3.9, nos encontramos, en primer lugar, la refracción:

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{n_v}{n_{CG}} \text{sen}(\theta_1)\right) \quad (15)$$

Donde n_v es el índice de refracción en el vacío y n_{CG} es el del coverglass.

De las coordenadas esféricas sacamos que:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (16)$$

$$\rho = \sqrt{e_{CG}^2 + r^2} \quad (17)$$

Aplicando trigonometría obtenemos:

$$\tan(\theta_2) = \frac{r}{e_{CG}} \quad (18)$$

De (18) despejamos el ángulo:

$$\theta_2 = \text{atan} \left(\frac{r}{e_{CG}} \right) \quad (19)$$

Igualando (15) y (19):

$$\arcsen \left(\frac{n_v}{n_{CG}} \text{sen}(\theta_1) \right) = \text{atan} \left(\frac{r}{e_{CG}} \right) \quad (20)$$

De (20) obtenemos el ángulo objetivo θ_1 :

$$\theta_1 = \arcsen \left(\frac{n_{CG}}{n_v} \cdot \text{sen} \left(\text{atan} \left(\frac{r}{1,2} \right) \right) \right) \quad (21)$$

Finalmente, incluyendo (16) en (21):

$$\theta_1 = \arcsen \left(\frac{n_{CG}}{n_v} \cdot \text{sen} \left(\text{atan} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{1,2} \right) \right) \right) \quad (22)$$

Si observamos la ecuación (22), vemos una ecuación que relaciona directamente el ángulo θ_1 con la posición del píxel del centroide (x , y) previamente calculada. Además, intervienen los índices de refracción del coverglass, que en nuestro caso es 1,52 , y el del vacío que es la unidad.

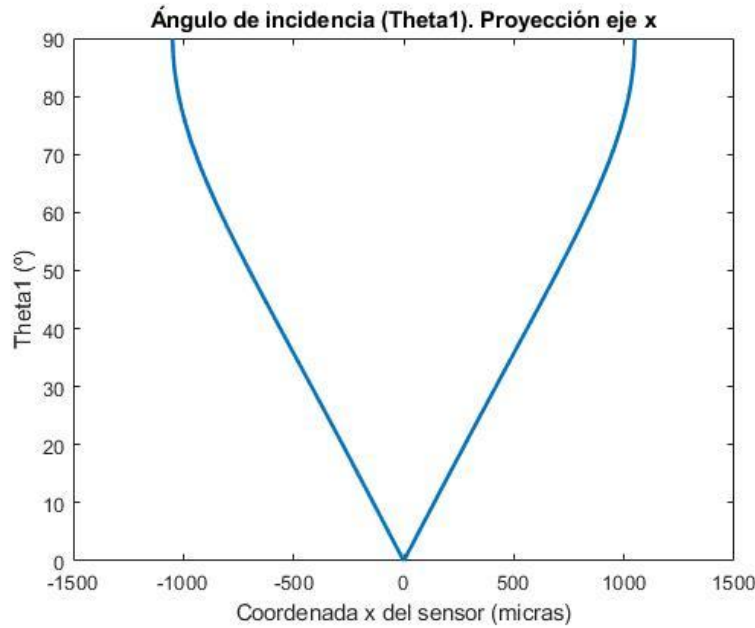


Figura 3.10 Gráfica de la proyección de θ_1 en el eje x.

En la figura 3.10 tenemos representado el comportamiento del sensor. En el eje horizontal se ha representado la coordenada x de nuestra cámara y en el vertical el ángulo θ_1 . Analizando la figura, notamos que cuando el ángulo θ_1 es 90° , no hay más puntos en la gráfica. Esto tiene sentido porque un θ_1 de 90° significa que el rayo incide horizontalmente, que sería el límite para que entre en el coverglass, teniendo en cuenta que es un valor completamente teórico.

Entonces, parte de la cámara no recibe luz. Es interesante ver cuál es la región útil de la cámara. Si en (21) consideramos θ_1 90° , obtenemos: $r = 1048,285 \mu\text{m}$. Por lo tanto, la región útil de la cámara es un círculo de radio r.

La forma de la curva también es importante. Vemos que el comportamiento es lineal en la mayor parte del rango. Por lo contrario, cuando nos acercamos al límite de la región útil de la cámara, observamos que pierde la característica de linealidad, lo que indica una pérdida en la calidad de funcionamiento.

3.4 Precisión

Otro estudio importante es el de la precisión que tenemos, es decir, si el centroide está en un píxel o en el de al lado cuánto varía el valor del ángulo de incidencia θ_1 . Usaremos el concepto de **precisión relativa**, calculado de la siguiente forma:

$$\text{precisión absoluta} = \theta_{1,i} - \theta_{1,i-1} \quad (23)$$

En (23) hemos considerado una proyección en el eje x del ángulo θ_1 , que se puede generalizar luego al resto del sensor utilizando el comportamiento simétrico del estudio anterior. En esta ecuación, relacionamos el ángulo calculado cuando el centroide está en la posición (i, 0) con el de la posición (i-1, 0). Nos interesa ver la variación cuando pasamos de un píxel a otro pero,

además, como el cálculo del centroide tendrá una precisión mayor que un píxel (la posición vendrá dada con decimales, por lo que el píxel será divisible en nuestros cálculos), estudiaremos la precisión no solo al pasar de un píxel al de al lado sino también la variación del ángulo respecto a la décima y la centésima parte de un píxel.

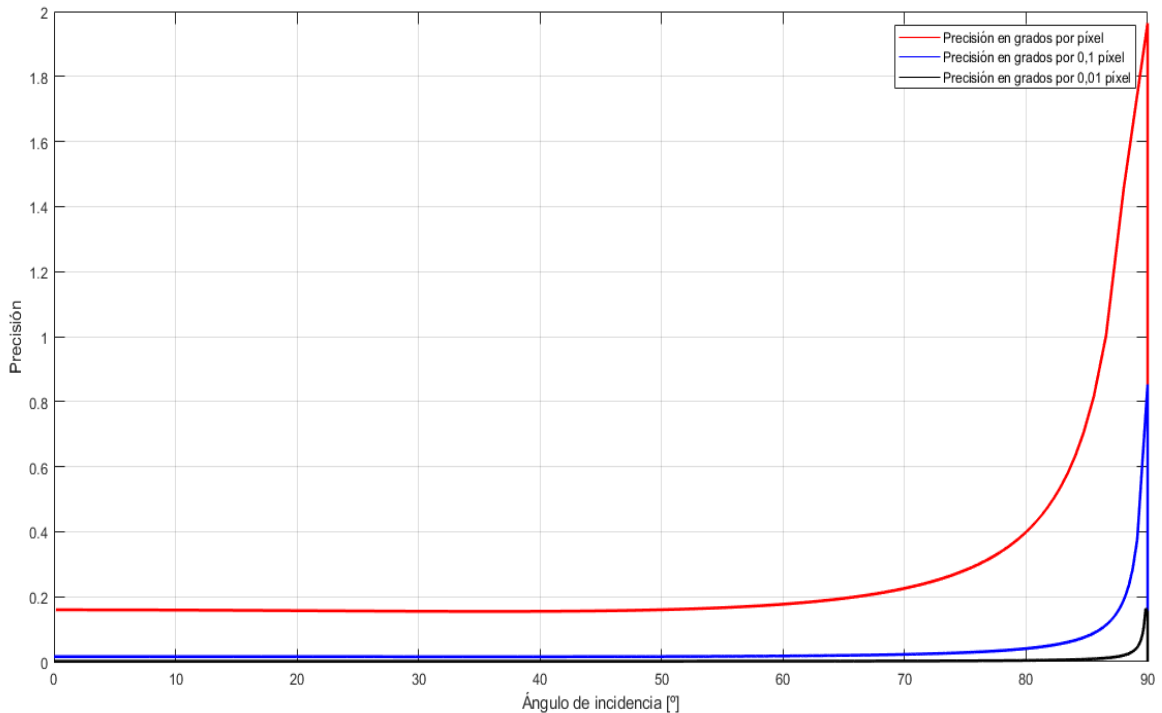


Figura 3.11 Precisiones absolutas del cálculo teórico del sensor.

En la figura 3.11 observamos tres curvas que son las correspondientes a la variación del ángulo de incidencia cuando cambiamos de píxel (curva roja), a la que se da cuando variamos 0,1 píxel la posición del centroide (curva azul) y la correspondiente a cambios de 0,01 píxel (curva negra).

Si analizamos la gráfica vemos que, a menor tamaño de desplazamiento horizontal, menor será la variación en ángulo. Lógicamente, si pasamos de un punto a otro muy próximo la variación en ángulo es mucho menor que si la distancia de los puntos es mayor. Por eso las curvas están desplazadas en el eje y.

Por otro lado, si nos fijamos en la forma, vemos que las tres se mantienen más o menos constantes, con un comportamiento lineal, hasta llegar a valores cercanos a los 80° que marca nuestro FOV. Cuando estamos en torno a ese valor, la curva gana pendiente, lo que significa que la variación en ángulo aumenta, perdiendo precisión. Este comportamiento es el esperado porque cuando el haz luminoso llega con un ángulo mayor, la precisión debe empeorar porque la variación en ángulo aumenta. Vemos también que para un ángulo de 90°, las curvas se cortan, esto es porque 90° es el límite teórico que marca la entrada de luz en nuestro sensor.

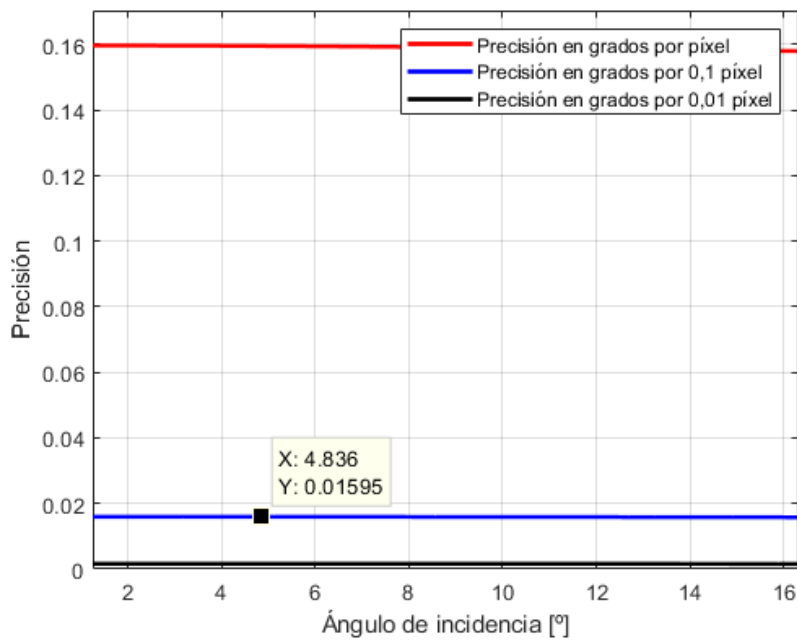


Figura 3.12 Zoom de la gráfica de precisiones.

En la figura 3.12 se muestra una ampliación de la figura 3.11 en la zona lineal. Podemos ver que obtenemos los siguientes resultados:

Desplazamiento horizontal	Precisión (variación absoluta del ángulo)
1 píxel	0,16°
0,1 píxel	0,016°
0,01 píxel	0,0016°

Tabla 3 Precisiones en la zona de comportamiento lineal

Todos estos cálculos son suponiendo **condiciones ideales**, es decir, que todo está fabricado y ensamblado a la perfección sin ningún tipo de defecto. Sin embargo, todos sabemos que la realidad no es ideal y que existen errores que alterarán el comportamiento que los cálculos previos predicen.

Antes de comentar qué nos puede dar problemas, es necesario explicar los conceptos de exactitud (**accuracy** en inglés, más utilizado) y precisión.

La exactitud o accuracy hace referencia a la diferencia que hay entre el valor medido y el valor real, mientras que la precisión mide la repetitividad de las medidas, o sea, cuanto más parecidas sean las medidas tomadas en las mismas condiciones, mayor será la precisión.

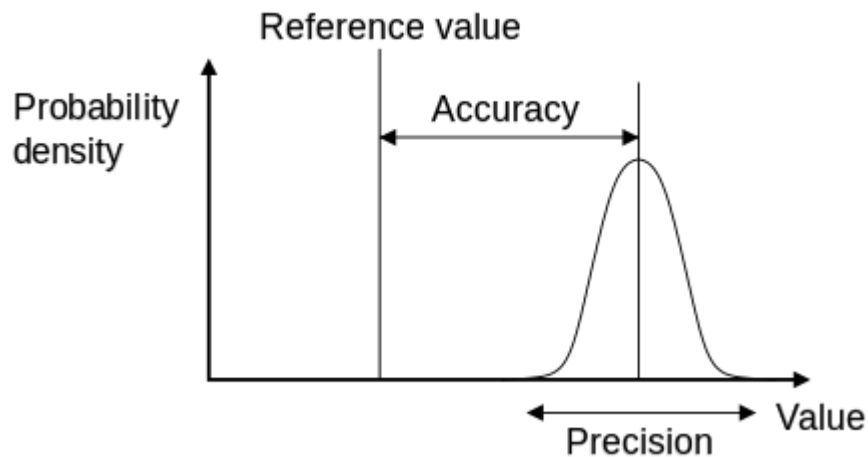


Figura 3.13 Accuracy VS Precision

Los errores y la cuantificación de la precisión se estudian con distribuciones probabilísticas. Los distintos errores siguen diferentes distribuciones, sin embargo, cuando superponemos todos ellos el resultado es siempre una **distribución gaussiana**, que se define con la media y la desviación típica. En la figura 3.13 se distingue fácilmente la accuracy, que mide la diferencia entre la media de nuestra distribución y el valor real, y la precisión, que afecta a la forma de la curva. En definitiva, cuanto más se acerque la media al valor real, mejor será la exactitud, y cuanto más picuda sea la forma de la distribución, mejor resultado obtendremos en términos de precisión.

A parte de los terminos de accuracy y precisión, que son los que se usan normalmente, la European Cooperation for Space Standardization (**ECSS**) propone otros términos que son los estándar en proyectos para la European Space Agency (**ESA**). Algunos de ellos son:

- AKE (absolute knowledge error). Indica el valor instantáneo del knowledge error (e_K), que es la diferencia entre la salida estimada del sistema y la salida actual obtenida.
- MKE (mean knowledge error). Media del knowledge error en un intervalo de tiempo dado.
- APE (absolute performance error). Hace referencia al valor del performance error (e_P) en un instante de tiempo determinado. Este error es la diferencia entre la salida deseada y la conseguida en este instante.
- MPE (mean performance error). Media del performance error en un intervalo de tiempo especificado.
- PDE (performance drift error). Es la diferencia entre las MPE tomadas en dos intervalos de tiempo en un solo periodo de observación.
- PRE (performance reproducibility error). Es la diferencia entre las MPE tomadas en dos intervalos de tiempo en diferentes periodos de observación. La diferencia con el PDE radica en que éste se usa para cuantificar el cambio del performance error en una observación larga; mientras que el PRE es usado para medir la accuracy a la cual es posible repetir una observación un un instante posterior.
- RKE (relative knowledge error). Diferencia entre el valor del knowledge error en un instante dado y su media en un intervalo que contiene a ese instante.
- RPE (relative performance error). Diferencia entre el valor del performance error en un instante dado y su media en un intervalo que contiene a ese instante.

Los problemas que nos podemos encontrar que afecten a la precisión del UFSS pueden ser causados por:

- **Descentralización del pinhole.** Podría ser que el pinhole no se fabrique exactamente en el centro del coverglass, esto haría que nuestro centro teórico no se corresponda con el real, por lo que la curva de la figura 3.10 se desplazaría.
- **No paralelismo.** En nuestro diseño, filtro, coverglass y cámara son perfectamente paralelos, sin embargo, si en la fabricación introducimos una ligera inclinación en uno o varios de ellos, el resultado obtenido será un poco distinto al esperado.
- **No planitud.** Si el filtro o el coverglass no son planos, o sea, sus caras no son paralelas, volvemos a introducir una inclinación inesperada.
- **Refracción inesperada.** Como hemos comentado anteriormente, los cálculos se han hecho suponiendo, por ejemplo, que el coverglass y el cristal de la cámara tienen idéntico índice de refracción. Si esto no fuese así, tendríamos una refracción extra que no hemos tenido en cuenta.
- **Abombamiento.** Debido a las altas temperaturas y a los pequeños espesores que manejamos, el filtro o el coverglass podrían curvarse.
- **Corriente de oscuridad.** Cuando los pixeles tienen mucha temperatura, empiezan a conducir sin recibir luz, lo que introduce un ruido de fondo que hay que controlar.
- **Reflejos.** Hasta ahora, hemos considerado que el sensor solo recibe la luz del sol. La realidad es que, además del sol, la cámara capta la luz reflejada en la Luna, en la Tierra, y la que viene de otras estrellas. Por lo tanto, debe ser capaz de indentificar el sol.

Todo esto hará que la expresión (22) no nos sirva ya que nos da el valor del ángulo suponiendo un comportamiento ideal. Para tener en cuenta estos problemas, introduciremos **factores de corrección** en la ecuación que modificarán levemente la curva resultado, pareciéndose más a la realidad. En el capítulo de calibrado veremos más en detalle todo esto.

4 HARDWARE

A parte del diseño mecánico y el análisis óptico es fundamental el diseño electrónico del sensor, que será el encargado de darle vida al dispositivo y hacer que funcione.

El hardware del UFSS también tiene como referencia el Star Tracker de SolarMEMS, con el que comparte exactamente las mismas placas de circuito impreso y componentes. En este trabajo nos vamos a centrar en la descripción general de los componentes más importantes.

La electrónica está formada por dos PCBs conectadas entre sí. En la primera placa encontramos como componentes principales la cámara y cuatro reguladores lineales de tensión (LDO). En la segunda se sitúa la FPGA, que es la encargada de realizar todo el procesamiento de la información y el control de la cámara.

4.1 Cámara

El trabajo del UFSS, como sensor solar que es, consiste en captar la luz del sol y determinar su posición. El componente encargado de traducir la energía luminosa en una señal eléctrica que podemos procesar posteriormente es la cámara.

Un sensor de imagen no es más que una matriz de píxeles que generan una corriente eléctrica al ser iluminados. En el UFSS se usa el **sensor de imagen digital CMOS MT9P031** de Aptina Imaging.

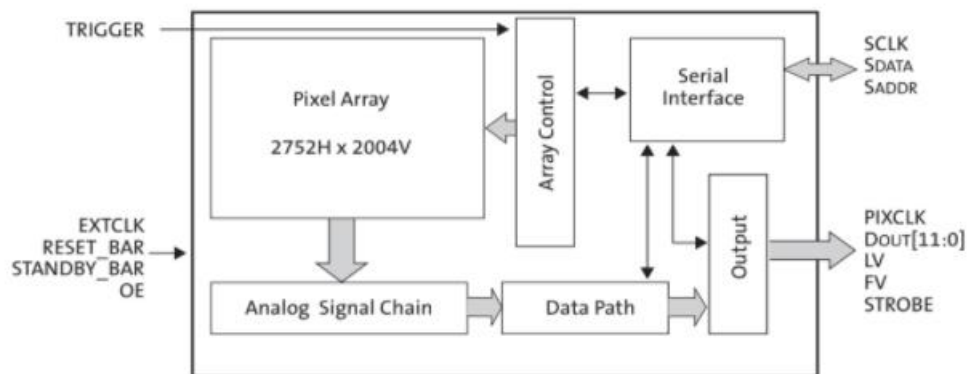


Figura 4.1 Diagrama de bloques de la cámara

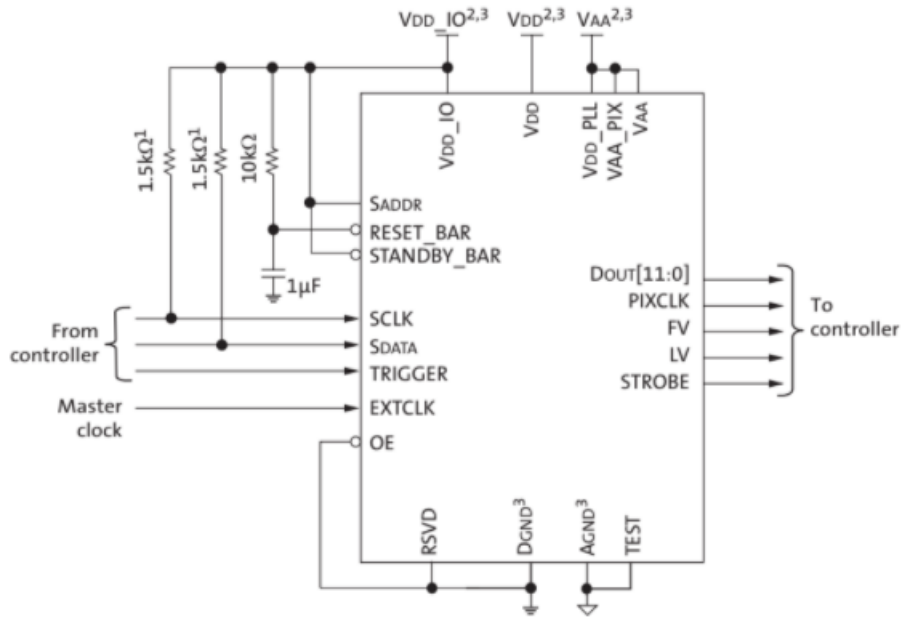


Figura 4.2 Configuración típica de la cámara

El MT9P031 tiene una matriz de 5Mp y genera una salida de 12 bits por píxel (variable Dout) por cada ciclo de PIXCLK, por lo que se lee un píxel por ciclo de PIXCLK. Este dato es válido si las señales FV y LV están a nivel alto.

FV	LV	Result
1	1	Valid Image Data
0	0	Vertical Blanking
1	0	Horizontal Blanking

Tabla 4 Valores de FV y LV

El sensor necesita un reloj externo para funcionar que puede ser de un máximo de 96MHz si la tensión $V_{DD_IO} = 2,8V$. Mientras que si $V_{DD_IO} = 1,8V$, la frecuencia máxima es de 48MHz. Esta tasa puede dividirse internamente.

En cuanto a la comunicación de la cámara con el controlados, se lleva a cabo a través de un protocolo serie controlado por la señal SCLK y la señal S_{DATA} por donde entran y salen los datos. Tanto el maestro como el esclavo pueden escribir pueden escribir en esta línea.

El protocolo de comunicación serie se compone de:

- 1) **Bit de START.** La línea S_{DATA} se pone a 0 para indicar que empieza la comunicación. Si el bus está libre, tanto S_{DATA} como SCLK están a nivel alto.
- 2) **Dirección de esclavo.** Después del bit de START, vienen los siguientes 8 bits que indican la dirección del esclavo con el que se va a establecer la comunicación.

- 3) **Bit de reconocimiento.** El esclavo confirma su dirección poniendo S_{DATA} a nivel bajo durante un tiempo.
- 4) **Mensaje.** Los siguientes 8 bits componen el mensaje.
- 5) **Bit de STOP.** Flanco de subida de S_{DATA} mientras SCLK está a nivel alto.

Sin embargo, los registros internos del MT9P031 usan datos de 16bits, por lo que se envían dos mensajes de 8 bits separados por un bit de confirmación.

Por defecto, la resolución es completa llegando a una tasa de 14fps. Además, la cámara tiene distintos **modos de lectura** como pueden ser el **skipping** o el **binning**, que sirven para reducir la resolución, lo que nos conviene cuando no interesa estar leyendo imágenes completas.

4.2 Reguladores de tensión

En la primera PCB del UFSS encontramos cuatro reguladores lineales de tensión que sirven para fijar tensiones a 1,2, 1,8, 2,8 y 3,3 V.

Se han usado el regulador **LM117QML** que es ajustable. Tiene tres pines principales: tensión de entrada, tensión de salida y pin de ajuste; además del pin GND.

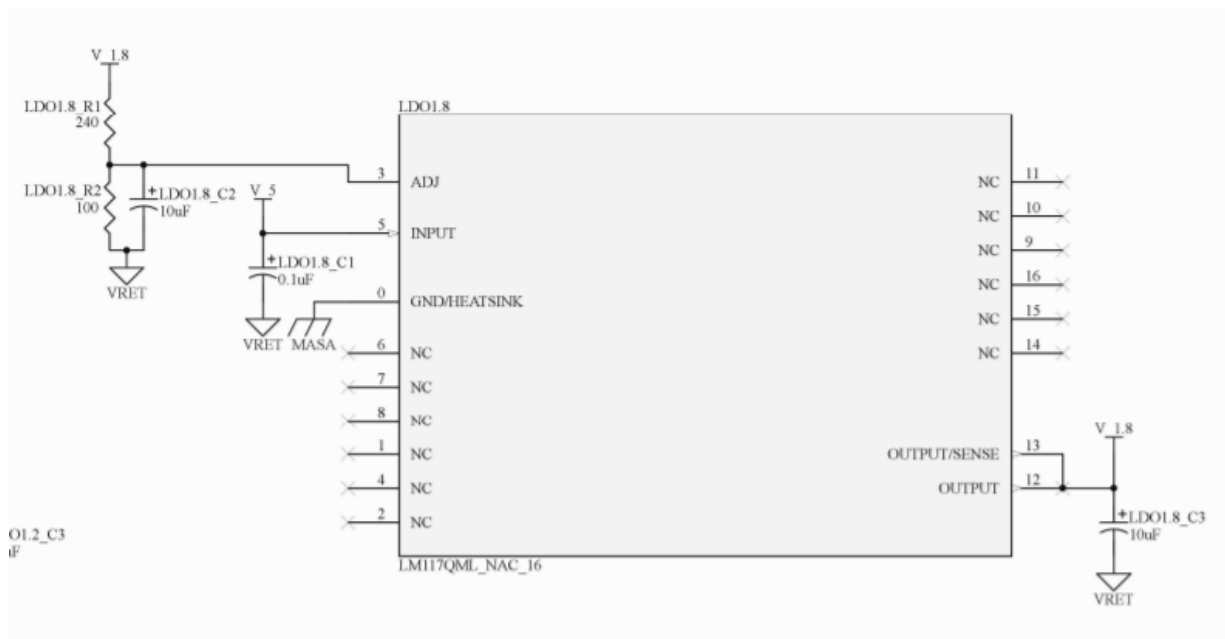


Figura 4.3 Configuración LDO 1.8V

En la figura 4.3 tenemos el esquemático del LDO con salida 1,8V. La entrada son los 5V a los que funciona la alimentación del sensor y la salida son 1,8V en este caso. En ambos casos se utilizan condensadores para eliminar el ruido de la señal y conseguir una tensión más estable. El pin ADJ es el usado para ajustar la tensión de salida. Para ello se usa la siguiente expresión:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \cdot R_2 \quad (24)$$

Donde $V_{ref} = 1,25 V$ para la familia LM117, I_{adj} es la corriente del pin ADJ y V_{out} es la tensión de salida. La configuración se lleva a cabo con las resistencias R_2 , que es la que está conectada a la tensión de referencia VRET, y R_1 conectadas en serie.

4.3 FPGA

La encargada de controlar la cámara, capturar la imagen, calcular el centroide y dar como salida el ángulo del sol es la FPGA **SmartFusion 2 M2S050**.

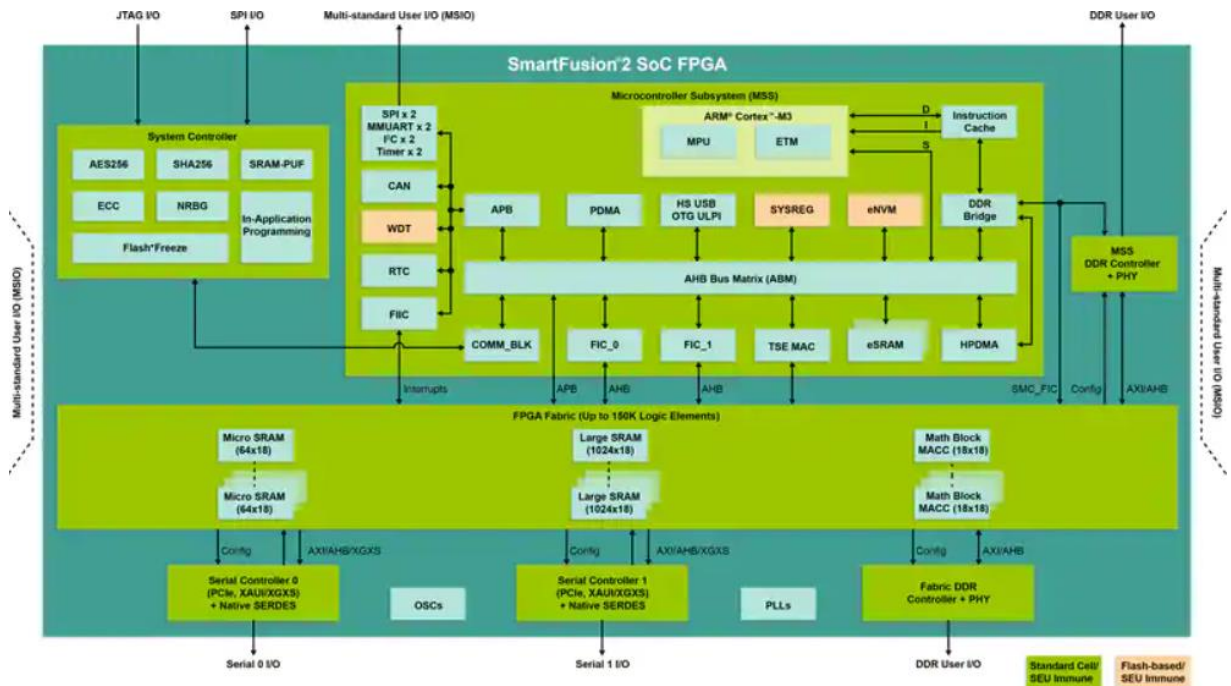


Figura 4.4 Diagrama de bloques SmartFusion2 SoC (imagen extraída de la web de Digikey)

La FPGA SmartFusion2 es un **SoC**, esto significa que las funciones de interfaz periférica están implementadas en un núcleo rígido de silicio.

Uno de los aspectos más interesantes es el subsistema microcontrolador (MSS) que usa un procesador ARM Cortex M3. Esto es importante porque permite programar en C gran parte del software del UFSS lo que hace más sencilla esta tarea.

5 SOFTWARE

Hasta ahora, el Ultra Fine Sun Sensor ha compartido la electrónica con el Star Tracker y el cuerpo de la mecánica es prácticamente el mismo en un dispositivo y en otro. Con el software seguimos en la misma línea, puesto que el programa usado por el Star Tracker sirve también para el UFSS.

El porqué de la posibilidad de emplear el mismo software para ambos equipos es evidente conociendo su funcionamiento. Mientras el Star Tracker detecta varias estrellas y con ellas, mediante un complejo algoritmo, calcula la actitud del satélite, el UFSS hace lo propio, pero fijándose únicamente en el Sol, que no deja de ser una estrella.

Sin embargo, el uso del mismo software se limita a las pruebas. En una fase posterior, el programa del UFSS será similar pero no idéntico al del Star Tracker. Esto es lógico porque el UFSS está pensado para ver una única estrella de gran tamaño, por lo que no necesita la complejidad del Star Tracker, que debe ser capaz de trabajar con varias estrellas y utilizar un procesamiento de datos más complejo, como puede ser el uso de una base de datos con información de miles de estrellas.

En este capítulo describiremos de manera superficial el funcionamiento del sensor, los parámetros más importantes para las pruebas realizadas y la interfaz que se usa para manejar el sensor a la hora de hacer los ensayos.

5.1 Descripción general

Los encargados de ejecutar los cálculos y hacer funcionar el sensor de imagen son la FPGA y el microprocesador que puede simularse en la misma. Esto implica que tengamos que usar dos lenguajes muy diferentes, uno a nivel de hardware para programar la FPGA, que es el **VHDL** y otro para el microprocesador, que es el **lenguaje C**.

5.1.1 FPGA

La FPGA es el cerebro del dispositivo. Se encarga de recoger toda la información de la cámara para calcular el centroide del Sol. Por otro lado, realiza algunos cálculos como el del umbral automático, que consiste en modificar el umbral de radiación para el cálculo del centroide.

5.1.2 Microprocesador

En el código en C del microprocesador, realizamos los cálculos necesarios para obtener el vector solar a partir del centroide calculado por la FPGA. Además, se encarga de establecer las comunicaciones necesarias entre FPGA, micro, cámara y satélite.

5.1.3 Máquina de estados

Se implementa también una máquina de estados, que es interesante analizar para entender de manera general el funcionamiento del sensor.

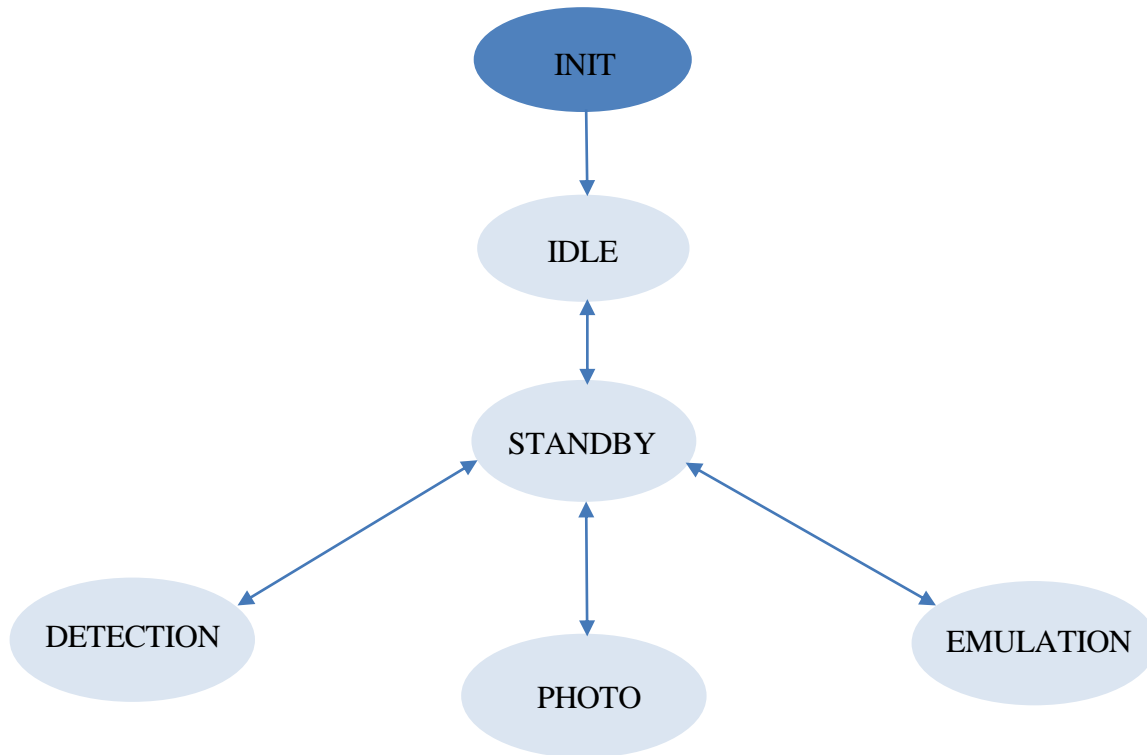


Figura 5.1 Máquina de estados

Cuando se inicia el UFSS o se hace un reset, el sistema se pone en estado **IDLE**. Tanto la FPGA como la cámara están inactivas, funcionando solo la comunicación UART para pasar a otro estado. De esta forma, se consigue un estado en el que el consumo, al estar parte del sistema inactivo, es bastante bajo.

De **IDLE** pasamos directamente a **STANDBY**, estado base en el que todo está iniciado y funcional. Cuando se termina de ejecutar una tarea, foto, detección... el sistema vuelve automáticamente a standby.

En los estados **DETECTION** y **EMULATION**, se lanza una operación para detectar el centroide. El MSS (el subsistema microcontrolador que está implementado en la FPGA) manda una señal a la FPGA y a la cámara/emulador de cámara para que actúen. En **DETECTION** funciona la APTINA y en **EMULATION** funciona el algoritmo que simula las señales de la APTINA.

Cuando el sistema se pone en estado **PHOTO** se toma una foto del tipo indicado, que puede ser foto densa, parcial o comprimida. La densa es una foto comprimida de 290*218 cuyos píxeles comprenden la media de 8*8 píxeles reales. La parcial es una foto en alta definición de una zona concreta de la cámara (290*218 también). Por último, la comprimida puede tener cuatro variantes: que el píxel sea menor que el umbral, que se encuentre entre el doble del umbral y el propio umbral, entre el triple y el doble, y mayor que el triple. La foto más utilizada es la densa.

5.2 Parámetros

El sensor maneja un conjunto de parámetros con los que se puede modificar la imagen obtenida, así como parámetros que afectan al cálculo del centroide.

Los principales parámetros que afectan a la imagen son el tiempo de exposición, la ganancia analógica y la ganancia digital.

El **tiempo de exposición** es el tiempo que está la cámara capturando luz, por lo tanto, a mayor tiempo, mayor será la cantidad de luz captada por el sensor y la imagen será más clara. En el UFSS manejamos tiempos de exposición bajos para evitar la saturación de la cámara.

La **ganancia analógica** es un parámetro que mantendremos siempre a un valor mínimo de 8. Está relacionado con la etapa de electrónica analógica que tienen los píxeles de la cámara. A mayor ganancia, mayor claridad en la foto.

La **ganancia digital** amplifica el valor de radiación de cada píxel. Al igual que con la analógica, un mayor valor de ganancia digital implica una mayor intensidad en la foto.

En los ensayos, iremos modificando estos valores hasta encontrar una combinación que nos aporte una imagen suficientemente nítida como para distinguir el sol y encontrar su centroide de manera sencilla.

Para el cálculo del centroide, hay algunos parámetros que son interesantes, como el umbral de intensidad de radiación y el radio mínimo.

El **umbral de intensidad de radiación** es el valor de intensidad a partir del cual el algoritmo buscará el centroide. Es importante ajustarlo de manera correcta para evitar que pueda afectar el ruido, iluminación del borde de la imagen, etc. El valor irá variando automáticamente, de forma que el sensor será capaz de ajustarlo al nivel de intensidad de cada imagen.

El **radio mínimo** hace referencia al número mínimo de píxeles que debe ocupar una zona iluminada para que pueda considerarse como el sol. Al igual que el umbral, es importante elegir un valor adecuado para que el algoritmo sea capaz de distinguir el sol frente a otras cosas que pueda ver el sensor. Análogamente, también existe un radio máximo.

5.3 Interfaz de pruebas

Una vez cargado el software en el equipo, es necesario poder comunicarse de manera sencilla con el sensor para poder hacer pruebas tomando fotos, variando los parámetros del sistema y ver posibles errores de funcionamiento. Esto lo conseguimos programando una interfaz de usuario que consiste en un panel con distintas opciones de configuración del sensor, una pantalla donde se representa la imagen capturada, una serie de botones para comunicarnos con él, etc.

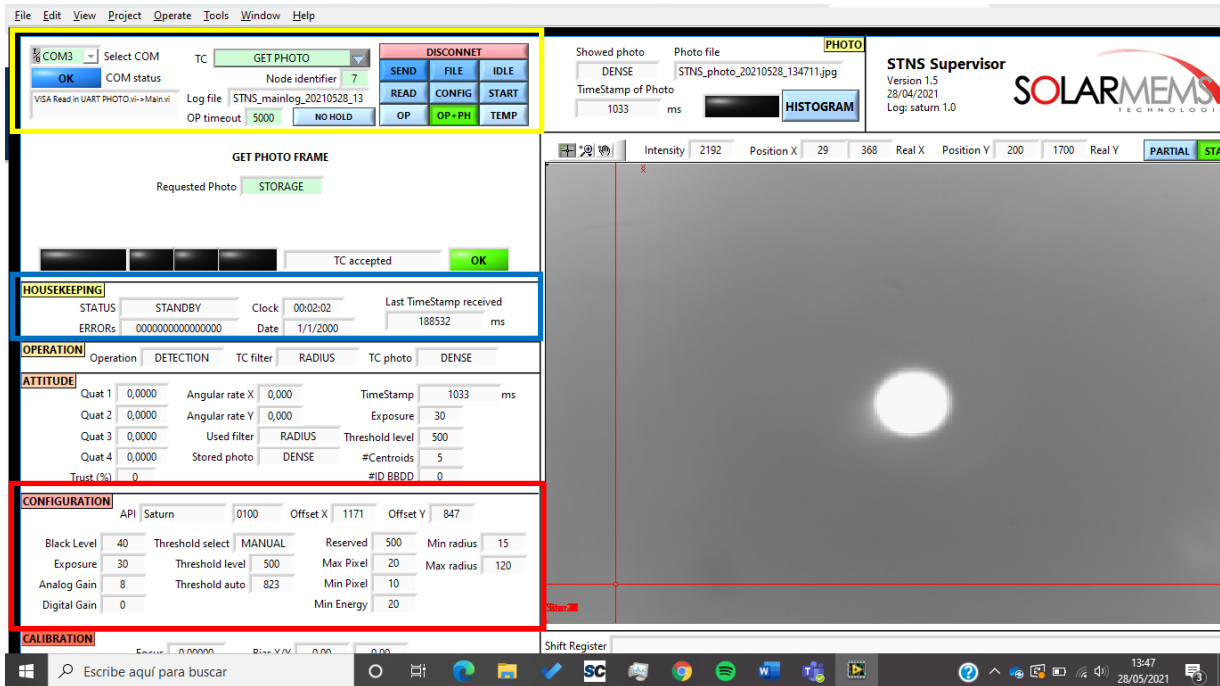


Figura 5.2 Panel de pruebas

En la figura 5.2 vemos el panel de pruebas. Esta interfaz ha sido programada con Labview y, como viene siendo habitual, la comparten UFSS y STNS (Star Tracker), por lo que mucha de la información no es necesaria en nuestro caso.

Ha simple vista, se distinguen fácilmente dos zonas. La parte de la izquierda con una serie de parámetros e información de interés, y la parte de la derecha en la que se representa la imagen obtenida por el sensor, además de algo de información relacionada directamente con la foto.

En la zona superior de la parte izquierda destacamos un cuadrante en amarillo. Lo más importante de esta sección es la **botonera**, con la que podemos realizar un conjunto de acciones con el sensor. Con estos botones, somos capaces de poner en marcha el sensor, establecer la configuración que deseemos y realizar las fotos. Además, hay una pestaña con varias opciones para seleccionar la acción a realizar (editar la configuración, mandar un reset, hacer una foto, etc.).

Dentro del cuadro azul, podemos ver en qué **estado** se encuentra en cada momento el sensor, además de un array indicador de **errores**. Si el array está completamente a 0, el funcionamiento es correcto. Sin embargo, si algún bit está a 1, hay algún error que, dependiendo del bit que sea, puede ser debido a una u otra causa.

Por último, en la zona roja encontramos la **configuración** actual del sensor. Los parámetros que comentamos anteriormente, la exposición, las ganancias analógica y digital, el umbral, el radio mínimo, etc. Entre otros parámetros, nos aparece también el umbral automático, que es una media de los valores de intensidad de los píxeles de la foto que se ha tomado. El umbral que ajustamos para el cálculo del centroide debe ser un valor superior a éste, llegando a valores un poco inferiores a la máxima intensidad de los píxeles del sol.

En la zona derecha encontramos la **imagen** obtenida. Tenemos la posibilidad de manejar el cursor por la foto para ver la intensidad que hay en cada punto de la imagen. Además, podemos hacer zoom y también tomar una foto parcial, a mayor resolución, de la zona que queramos.

6 CALIBRADO Y ENSAYOS

Una vez completado el diseño del sensor es necesario calibrarlo para comprobar su funcionamiento y corregir algunos de los errores comentados anteriormente.

6.1 Diseño del bracket

El bracket no es más que un soporte del sensor que se acopla al calibrador y que debe garantizar la estabilidad del mismo, así como, que la posición del centro óptico (en nuestro caso el centro de la cara externa del filtro) coincida con los ejes de giro de los motores del calibrador.

Partimos del diseño anterior, el usado para el FDSS.

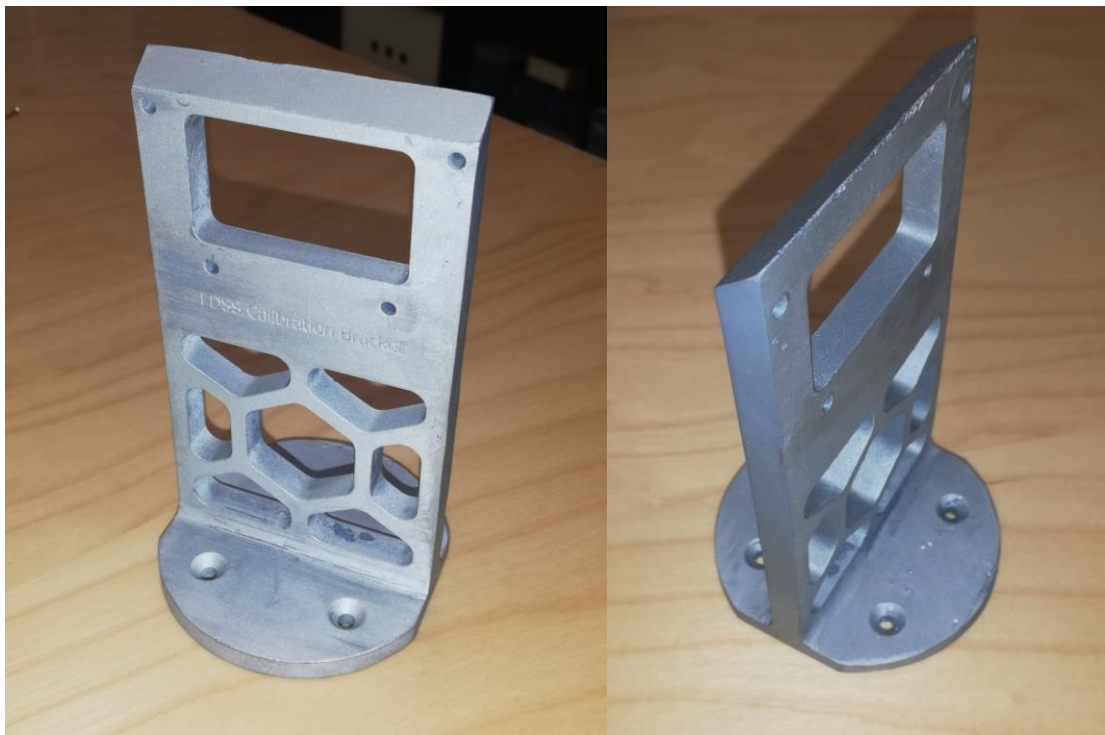


Figura 6.1 Bracket FDSS

El principal problema de este diseño es que **el eje de giro de la base no coincide con el centro óptico** de nuestro UFSS, por lo que debemos modificarlo. Para ello hemos de retrasar la zona donde se coloca el sensor hasta que el eje de giro pase por la cara externa del filtro.

Esta solución pasa por hacer una especie de escalón donde se apoyará el sensor. Esto puede crear inestabilidad por la flexión del bracket, así que se han añadido dos **nervios estructurales** para asegurar que no se produzca este efecto.

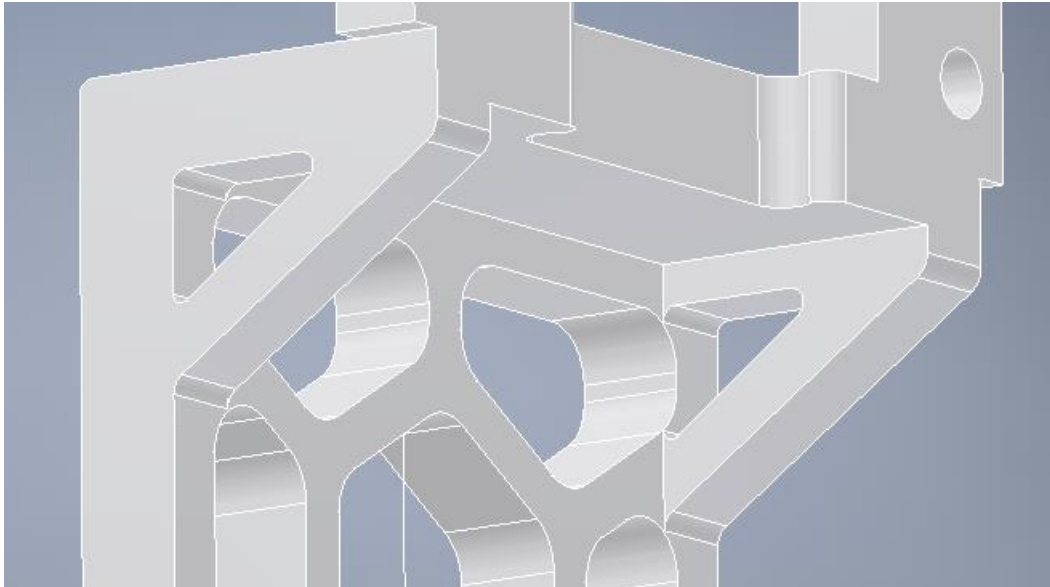


Figura 6.2 Nervios UFSS bracket

Una vez conseguida la alineación del eje de la base con el filtro, el siguiente paso es conseguir que el centro del filtro esté contenido en el eje del motor horizontal del calibrador. Esto implica ajustar la posición del UFSS en altura y posición horizontal.

Como el sensor va apoyado al escalón, basta con modificar su altura para que el centro del filtro se sitúe a la misma que el eje. Esta dimensión la sacamos del diseño antiguo, que es de 90,5 mm, quedando el escalón a una altura de 71,3 mm respecto a la cara inferior de la base.

Para ajustar la posición horizontal del sensor lo único que debemos hacer es diseñar los agujeros en los que se atornillará el UFSS de forma que este quede centrado.

Es necesario que el diseño evite cualquier imprecisión en el montaje. Por esto, para ayudar a la persona que va a montar el sensor en el bracket para calibrarlo, es necesario añadir unos topes tanto en el eje vertical como en el horizontal, de forma que el sensor quede perfectamente centrado. Por la morfología de nuestro bracket, el propio “escalón” en el que irá apoyado el UFSS, nos servirá de tope en el eje vertical. Para el horizontal medimos la distancia a la que se debe colocar el sensor respecto al canto lateral, y en uno de los lados diseñamos el tope horizontal como una pequeña pared.

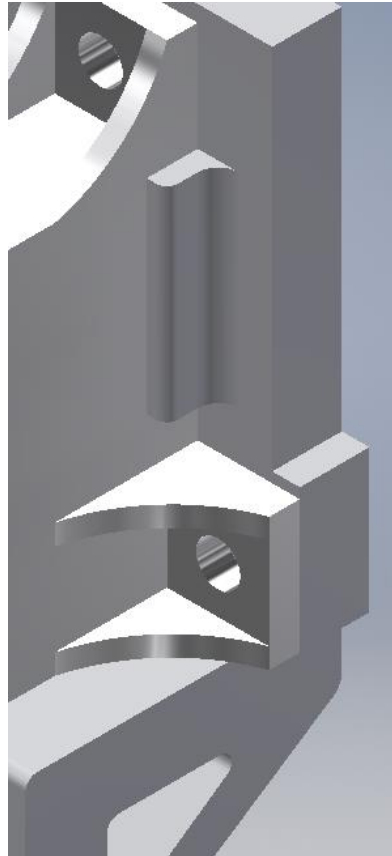


Figura 6.3 Tope horizontal bracket

Con esto ya tendríamos todo listo para que el sensor se encuentre en la posición correcta. Sin embargo, es importante ver cómo unimos el bracket con el calibrador y las dificultades que se puede encontrar la persona que lo vaya a montar.

En el diseño del bracket del FDSS se optó por una sujeción con cuatro tornillos, dos en la parte delantera y dos en la trasera. Por lo contrario, la configuración más usada son tres tornillos, dos delante y uno detrás.

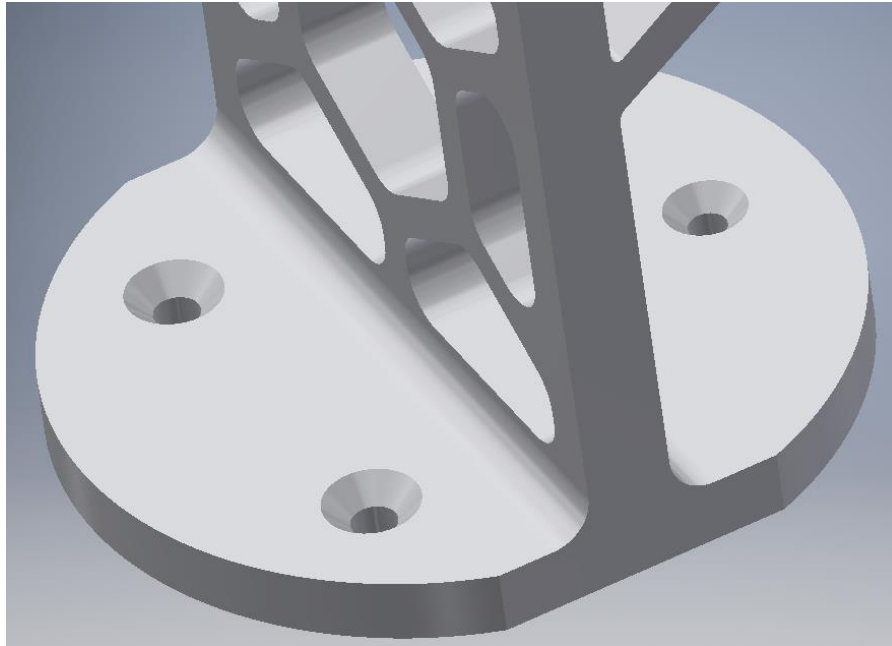


Figura 6.4 Base bracket UFSS

En este bracket tenemos la particularidad del escalón, que nos puede dar problemas a la hora de poner el tornillo trasero, ya que puede obstaculizar al destornillador. La solución por la que nos hemos decidido es hacer un rebaje que permita que la herramienta entre lo más vertical posible sin problemas.

Por último, el diseño de la parte trasera debe permitir la conexión y el fácil manejo de los cables, por lo que el hueco debe ser lo suficientemente amplio. Además, para asegurar un buen apoyo de toda la superficie del UFSS, hemos hecho unas pequeñas prolongaciones para las pestañas laterales.

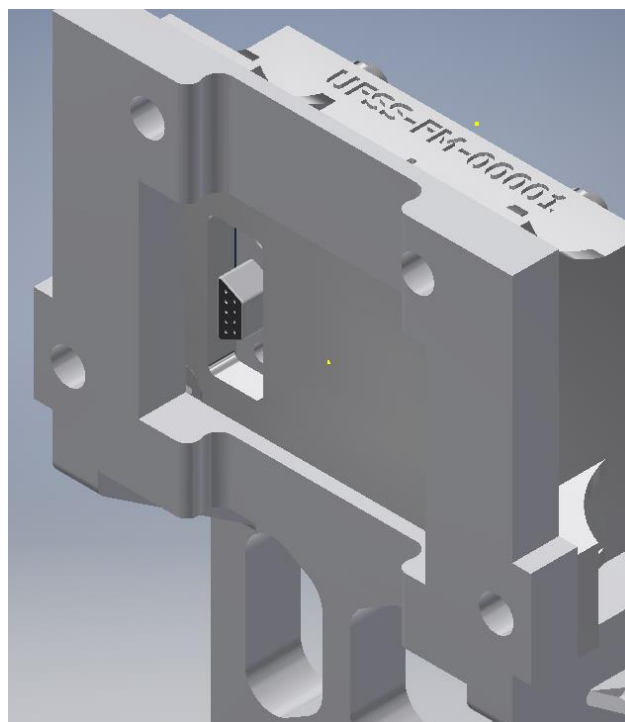


Figura 6.5 Parte trasera bracket UFSS

Con todo esto el diseño del bracket está finalizado y listo para ser fabricado en plástico y, finalmente, en aluminio.

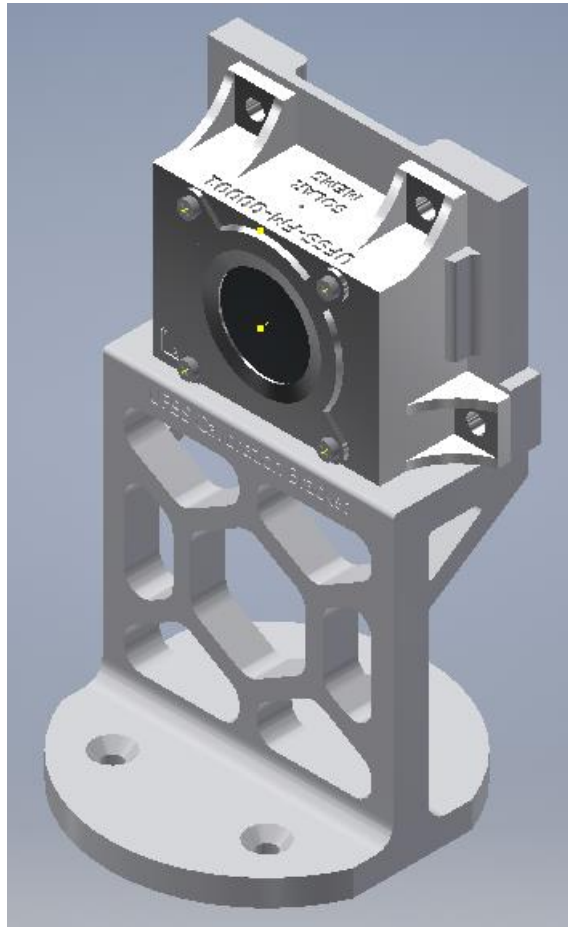


Figura 6.6 UFSS calibration bracket

6.2 Adaptador para pruebas

Para tener el sensor fabricado tal y como lo hemos diseñado es necesario ajustarse a los **plazos de entrega** de los fabricantes que, generalmente, suelen ser de varias semanas o incluso meses.

Tanto el UFSS en metal como el coverglass de 800 μm de espesor con el pinhole tienen un plazo de entrega mayor que el de este trabajo. Por lo tanto, para las pruebas es necesario adaptarse a lo que podemos tener dentro de nuestras restricciones de tiempo.

En nuestro caso, el UFSS y el bracket para su calibrado han sido fabricados en plástico de alta precisión, cuyo plazo de entrega es menor. Lógicamente, este material se puede usar para realizar algunas mediciones de prueba pero no para aplicaciones espaciales, donde se requiere la resistencia del aluminio, los tratamientos para la radiación, mayor precisión, etc.

Por otro lado, para nuestras pruebas disponemos de coverglass de espesor de 2,2mm, que es mucho mayor que el que usaremos finalmente.

Este cambio de espesor, afecta al diseño mecánico porque al triplicar el espesor del coverglass, el acople de la óptica diseñado ya no nos sirve. Además, el sensor final usará pegamento para fijar el coverglass con la cámara y el filtro con las pestañas inferiores. Para las pruebas de este prototipo no es conveniente pegar los elementos de la óptica por varias razones.

El primer motivo es que queremos tener la posibilidad de estudiar el comportamiento del equipo para pinholes de distintos diámetros. Esto implica que tenemos que poder cambiar el coverglass de forma sencilla, por lo que no podemos pegarlo a la cámara.

Otro motivo para no pegar el coverglass es que disponemos de una única PCB de prueba, ya que también se ve afectada por los plazos de fabricación y también es interesante probar su funcionamiento antes de hacer pedidos mayores. Entonces, no podemos pegar el coverglass porque la PCB quedaría inutilizada para el resto de cristales.

También nos interesa cambiar el filtro porque hemos adquirido filtros de distintos niveles de atenuación. Necesitamos también una forma fácil de cambiarlo.

Llegados a este punto, queremos probar la funcionalidad de nuestro sensor pero con las necesidades que hemos comentado es imposible mantener el FOV de 160° ya que el coverglass usado es muy grande y eso afecta a los cálculos ópticos. Sin embargo, el principal objetivo es tener un dispositivo funcional para hacer pruebas dentro del plazo sin importarnos el FOV. Los resultados obtenidos nos servirán para saber si nuestros cálculos previos están bien encaminados, ya que el comportamiento del dispositivo final será análogo.

Teniendo en cuenta todo lo comentado previamente, surge la necesidad de **diseñar un adaptador para la óptica** que nos permita colocar el filtro y el coverglass con una buena sujeción y que facilite su intercambio con la idea de probar distintos pinholes y filtros de diferente atenuación.

La idea principal es aprovechar la mecánica ya diseñada y añadirle una pieza de plástico que nos sirva de soporte para el sistema óptico.

El adaptador se fija a la mecánica usando la pieza de sujeción del filtro ya diseñada, la cual iría en la parte superior para sujetar el filtro. Ambas van unidas al chasis con tornillos, usando los agujeros roscados ya diseñados.

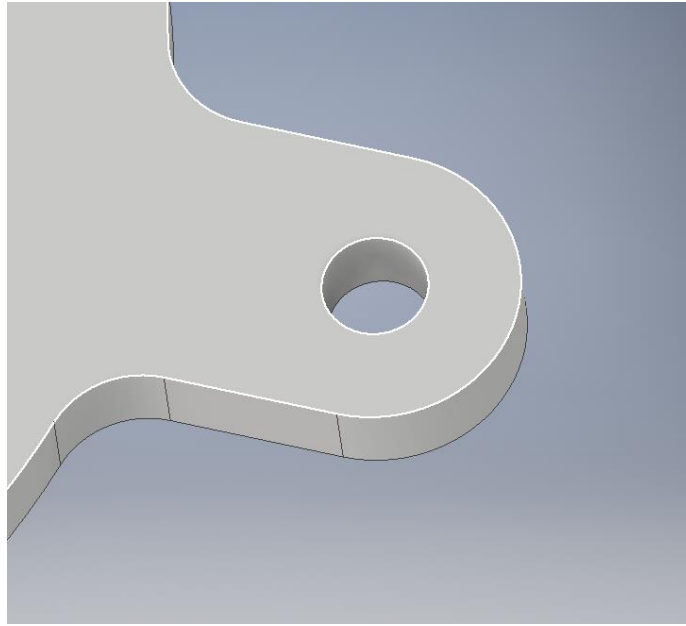


Figura 6.7 Agujero pasante adaptador

La forma del adaptador está pensada para que encaje en el hueco para la óptica de la mecánica.

En el caso del modelo de pruebas, como el coverglass es muy grande, eliminamos el gap para tener un resultado más contenido en dimensiones, facilitar el diseño del apoyo de los cristales y no perjudicar demasiado al campo de visión. Al prescindir del gap, filtro y coverglas están en contacto. El contacto directo de dos cristales hay que evitarlo por seguridad, por lo que entre ellos se pondrá una junta que hará más segura esta disposición.

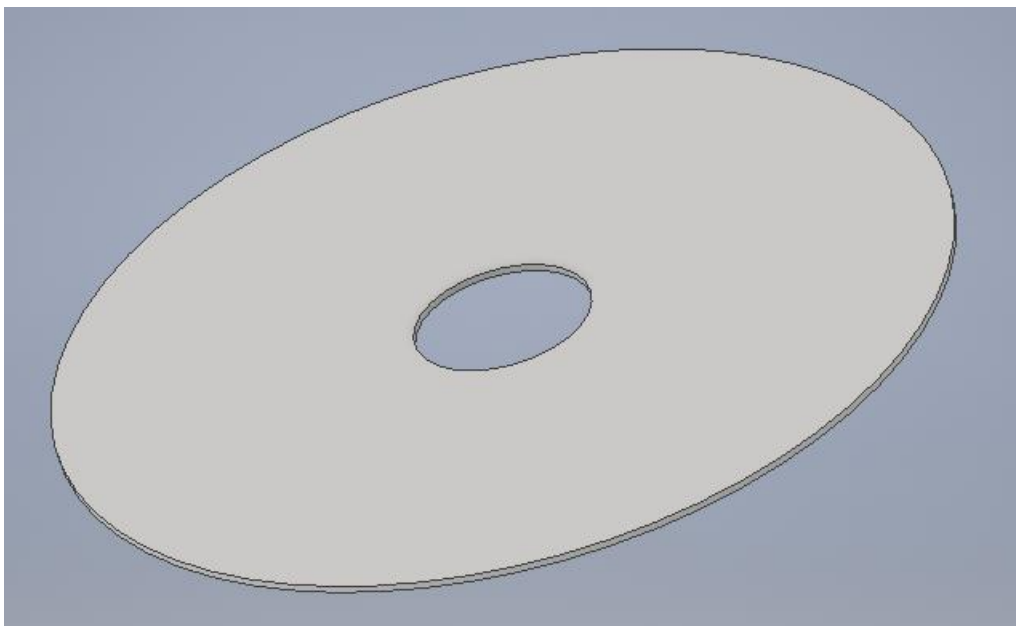


Figura 6.8 Junta filtro-coverglass

El propio filtro hará presión sobre el coverglass asegurándolo por la parte superior. Por

debajo, el coverglass va apoyado en unas pequeñas pestañas.

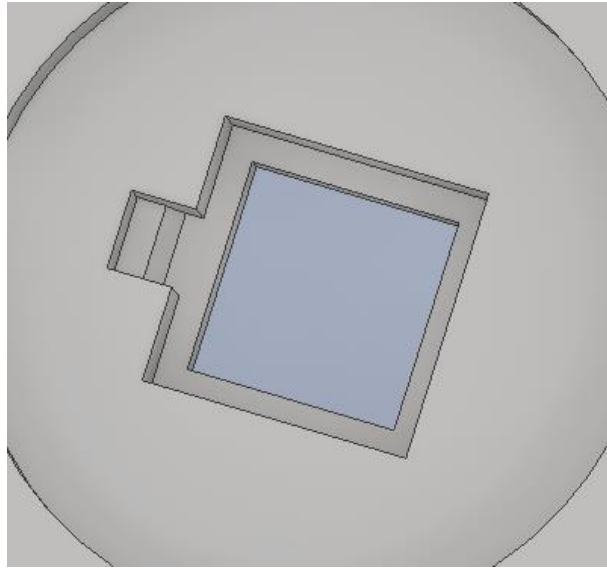


Figura 6.9 Pestaña de sujeción inferior del coverglass

Como el adaptador es de plástico no es necesario incluir juntas de contacto entre el cristal y el adaptador. De todas formas, se ha diseñado una junta cuadrada por si hiciera falta ponerla para elevar un poco el coverglass y asegurar que el filtro haga presión y no haya holguras que permitan el movimiento del coverglass. La junta es de 0,2mm de espesor.

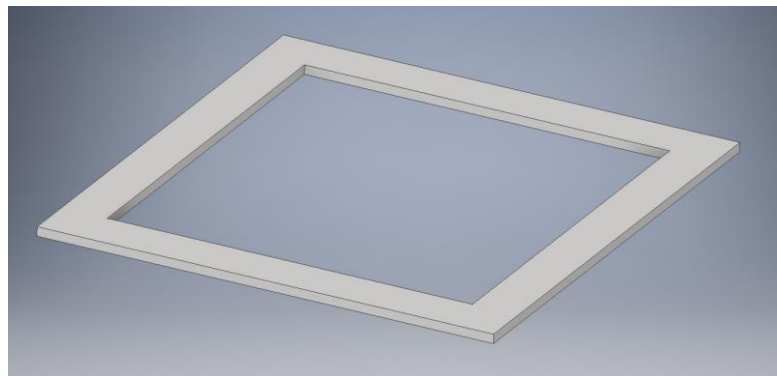


Figura 6.10 Junta cuadrada coverglass

Por último, como una de las principales razones de la fabricación de esta pieza es facilitar el cambio de los cristales para las pruebas, se ha incluido unos pequeños huecos para introducir las pinzas y que la extracción sea lo más sencilla posible.

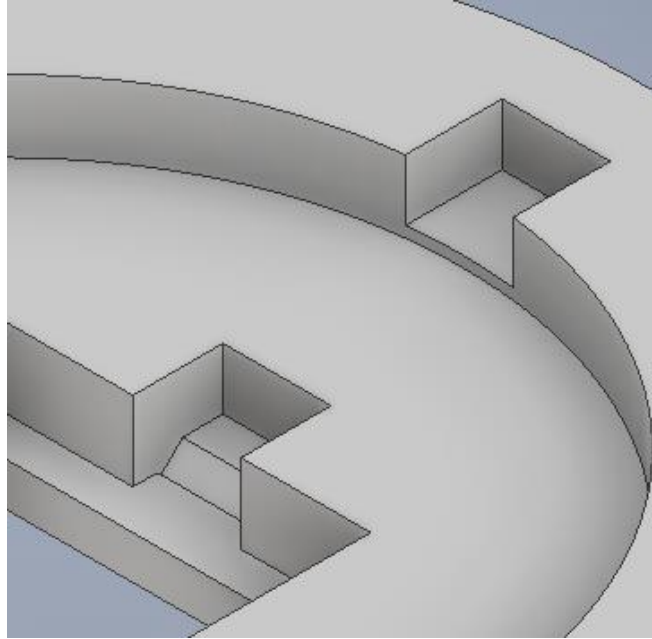


Figura 6.11 Huecos de extracción en el adaptador

Esta pieza solo sirve para las pruebas que se van a realizar antes de la finalización del plazo de este proyecto para comprobar la funcionalidad del sensor y ver si el comportamiento se corresponde con nuestros estudios teóricos. Como no tiene una finalidad industrial, no es necesario que cumpla exigencias mecánicas ni de gran precisión. Por lo tanto, no será fabricada en metal ni con un proceso de especial precisión, sino en **resina** con la **impresora 3D** de SolarMEMS con un buen acabado.

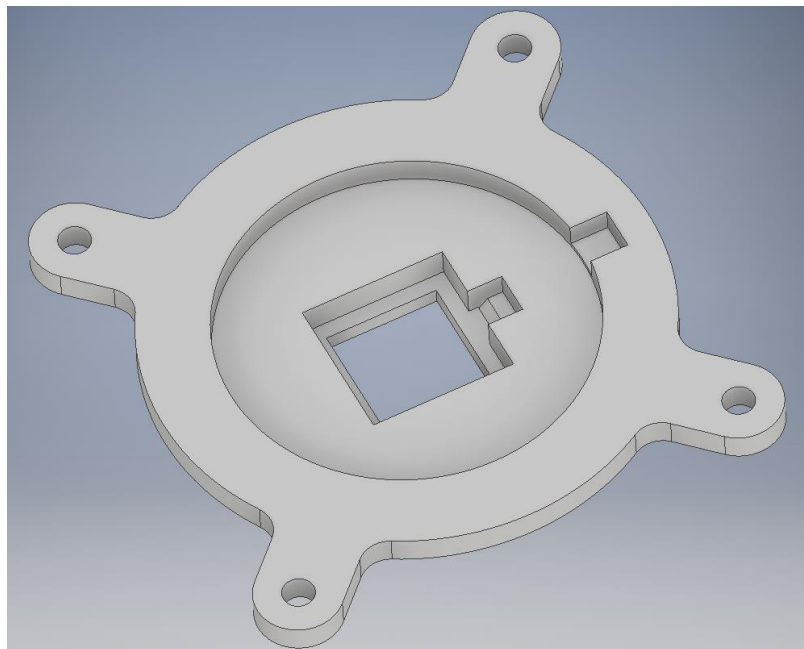


Figura 6.12 Parte superior del adaptador

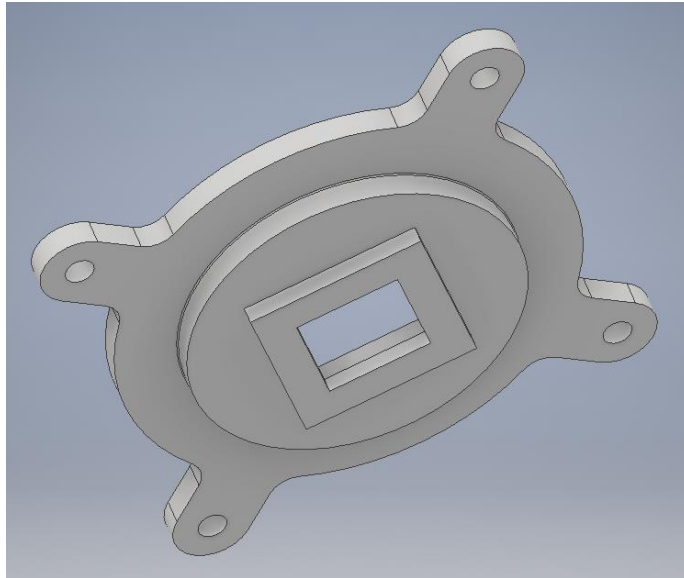


Figura 6.13 Parte inferior del adaptador

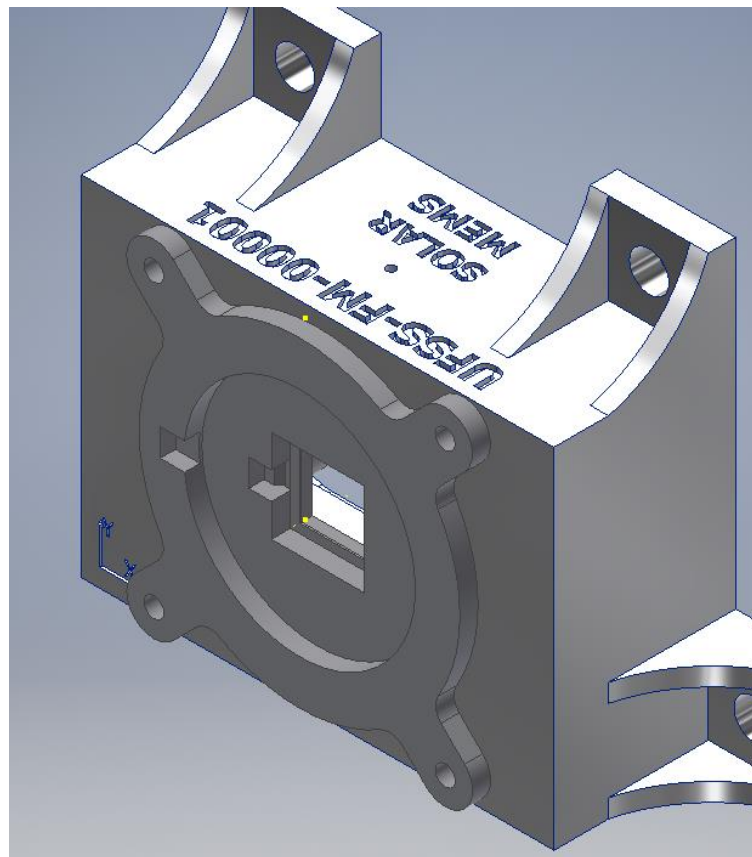


Figura 6.14 Adaptador en el sensor

6.3 Análisis óptico del equipo de pruebas

El uso de un coverglass de 2,2mm de espesor y la necesidad de ir cambiando los cristales para distintas pruebas, influyen en los cálculos ópticos del apartado 3.2.

Al disponer los elementos ópticos de una forma distinta, tenemos que volver a hacer unos

cálculos similares a los realizados para la óptica que finalmente se usará en el UFSS.

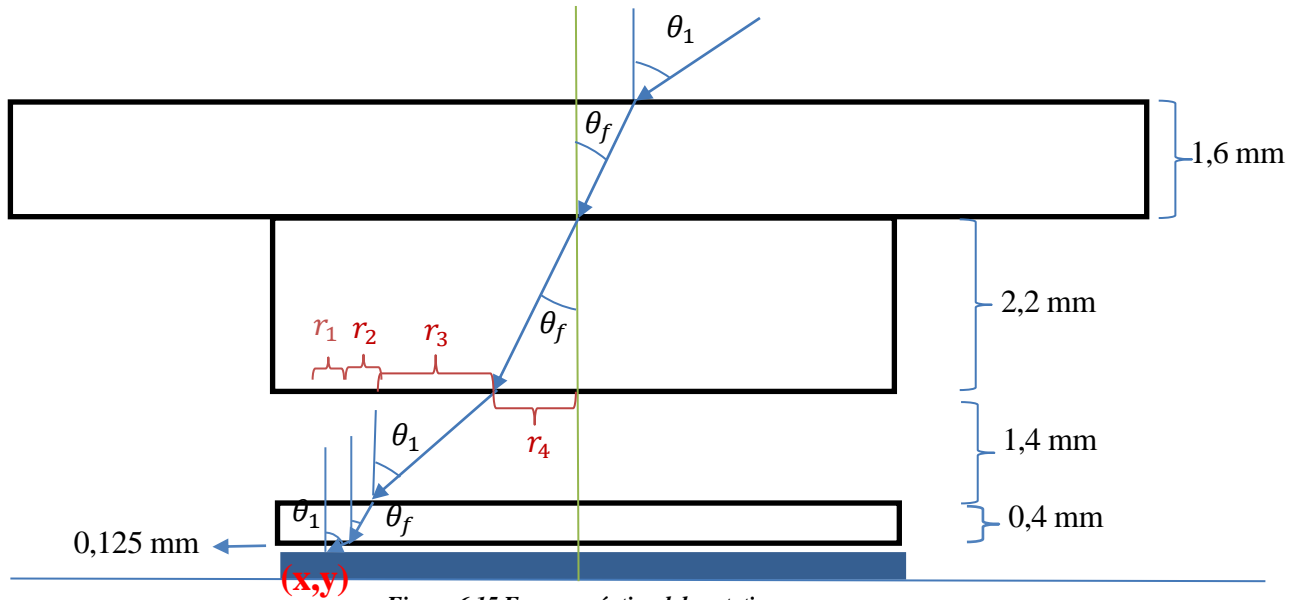


Figura 6.15 Esquema óptico del prototipo

En la imagen se representa un esquema de las refracciones en la óptica del dispositivo de pruebas.

En la parte superior, la luz llega al filtro con un ángulo θ_1 , el cual queremos calcular a partir del **píxel** (x, y) donde se encuentra el **centroide**. El rayo es refractado al entrar en el filtro y no varía al pasar al coverglass porque consideramos que ambos tienen un índice de refracción de 1,52. Finalmente, al salir del coverglass el medio del gap es el vacío por lo que el ángulo vuelve a ser el del principio. Una vez pasado el gap de vacío, llegamos a la cámara, que antes de llegar a la matriz de píxeles tiene otro coverglass y un pequeño gap vacío que debemos tener en cuenta para que los cálculos de las pruebas sean más precisos.

Para estudiar la óptica, tomamos la proyección sobre un plano radial del filtro y hacemos el análisis en coordenadas esféricas. Al tomar la proyección, la única incógnita que nos interesa es el ángulo θ_1 , olvidándonos de momento del ángulo azimutal.

Los cálculos son similares a los realizados en el apartado 3.3. El objetivo es encontrar la expresión matemática que relacione θ_1 con la posición (x,y) del centroide.

Para ello, si observamos primero lo que sucede en el gap de la cámara, obtenemos:

$$\tan(\theta_1) = \frac{r_1}{0,125} \quad (25)$$

Si conseguimos una relación entre r_1 y (x,y) habremos terminado. Sin embargo la relación que obtenemos no es tan directa.

$$r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (26)$$

Donde hemos tenido en cuenta la ecuación de la circunferencia con radio $r_1 + r_2 + r_3 + r_4$. En la ecuación 26 vemos que necesitamos las distancias r_2 , r_3 y r_4 para poder tener una expresión que relacione las coordenadas del centroide con el ángulo. Para ello, primero hacemos el estudio de refracciones aplicando la **Ley de Snell**:

$$1 \cdot \sin(\theta_1) = 1,52 \cdot \sin(\theta_f) \quad (27)$$

Donde hemos sustituido los índices de refracción del vacío (1) y de los cristales usados (1,52). Si despejamos θ_f :

$$\theta_f = \text{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right) \quad (28)$$

Para relacionar θ_f con r_2 basta con hacer la relación trigonométrica en el coverglass:

$$\tan(\theta_f) = \frac{r_2}{0,4} \quad (29)$$

Despejando r_2 :

$$r_2 = 0,4 \cdot \tan(\theta_f) \quad (30)$$

Hacemos el cálculo análogo para el resto de distancias:

$$r_3 = 1,4 \cdot \tan(\theta_1) \quad (31)$$

$$r_4 = 2,2 \cdot \tan(\theta_f) \quad (32)$$

Como el ángulo θ_f está directamente relacionado con el ángulo θ_1 en la ecuación 28, ya tenemos la relación directa entre las distancias y el ángulo:

$$r_2 = 0,4 \cdot \tan\left(\text{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right)\right) \quad (33)$$

$$r_4 = 2,2 \cdot \tan\left(\text{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right)\right) \quad (34)$$

Si sustituimos en 26 :

$$0,125 \cdot \tan(\theta_1) + 0,4 \cdot \tan\left(\text{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right)\right) + 1,4 \cdot \tan(\theta_1) + 2,2 \cdot \tan\left(\text{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right)\right) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (335)$$

Reorganizando los términos:

$$1,525 \cdot \tan(\theta_1) + 2,6 \cdot \tan\left(\operatorname{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right)\right) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (36)$$

La ecuación 36 relaciona el ángulo de incidencia con la posición del centroide en la cámara, que es calculada por la FPGA. Por lo tanto, si conocemos el centroide podemos calcular el ángulo.

Una vez hemos conseguido la expresión matemática, es necesario ver qué comportamiento es el esperado para poder comprobar luego si los resultados obtenidos en los ensayos concuerdan con los esperados gracias al análisis teórico.

Para facilitar el trabajo volvemos a usar la proyección para sustituir la raíz por el radio de la circunferencia:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (347)$$

Y pasamos todo al primer término para obtener una función del tipo $f(\theta_1, R) = 0$.

$$1,525 \cdot \tan(\theta_1) + 2,6 \cdot \tan\left(\operatorname{asin}\left(\frac{1}{1,52} \cdot \sin(\theta_1)\right)\right) - R = 0 \quad (358)$$

El estudio del comportamiento es sencillo una vez llegado a este punto. Basta con representrar la función $f(\theta_1, R)$ para distintos valores de R. En concordancia con la ecuación 36, las raíces de la función será el ángulo que buscamos.

Por lo tanto, la idea es, primero ver si la forma de la función es similar a la que obtuvimos en el primer análisis (figura 3.10) y luego estimar el FOV que esperamos en las pruebas.

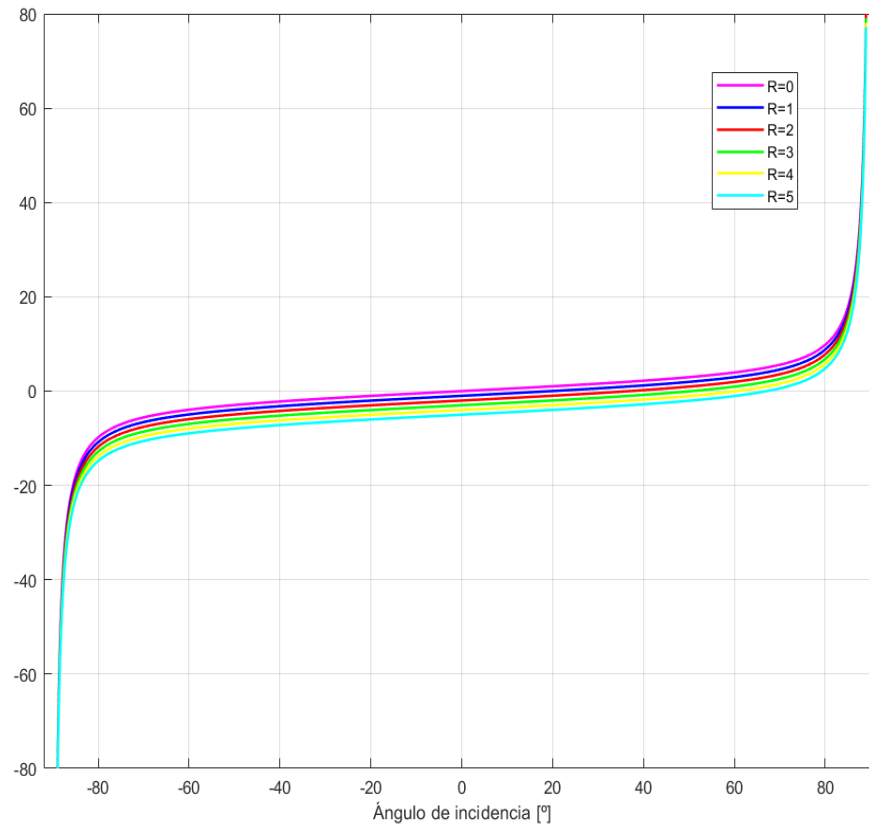


Figura 6.16 Gráficas de $f(\theta_1, R)$ para distintos valores de R

En la figura 6.16, se ha representado la función para varios valores de R . Podemos ver que hay **asíntotas en los valores de $\pm 90^\circ$** , valor para el cual es imposible que entre el rayo porque iría paralelo al filtro. Nos interesa fijarnos en el valor que toma el ángulo cuando la función vale 0 (para cumplir la ecuación 36), o lo que es lo mismo, el **corte con el eje de abscisas**. Este valor será el **ángulo de incidencia para un determinado valor de R** , por lo tanto, somos capaces de relacionar el ángulo con la posición del centroide ya que, como hemos visto, R es el radio de la circunferencia que contiene al centroide.

De la gráfica anterior sacamos más información. Si observamos la evolución de la gráfica cuando variamos R , podemos ver que a **mayor valor de R** la gráfica baja manteniendo su forma. Si la gráfica está en una posición inferior, el corte con el eje x se desplaza hacia valores mayores. Esto tiene sentido porque aumentar R significa hacer el estudio para una distancia mayor respecto al centro de la cámara y esto significa que el **ángulo** debe ser **mayor** porque los 0° se dan cuando el rayo incide directamente en el centro (suponiendo que todo funciona perfecto y que el sensor está bien calibrado).

Por razones físicas, y como es lógico, **el valor de R no es ilimitado**, por lo que no podemos trabajar en todo el rango de ángulos. Esto implica que debe haber un valor de R a partir del cual el sensor no funcione correctamente o, directamente, que no sea capaz de realizar una lectura del ángulo. Será ese punto el que nos sirva para hallar el FOV de nuestro sensor.

La cámara usada en el UFSS es de 10x10 mm, entonces una circunferencia de $R \geq 5$ mm se saldrá del sensor y cualquier rayo que caiga por encima de esa distancia será imposible que sea leído.

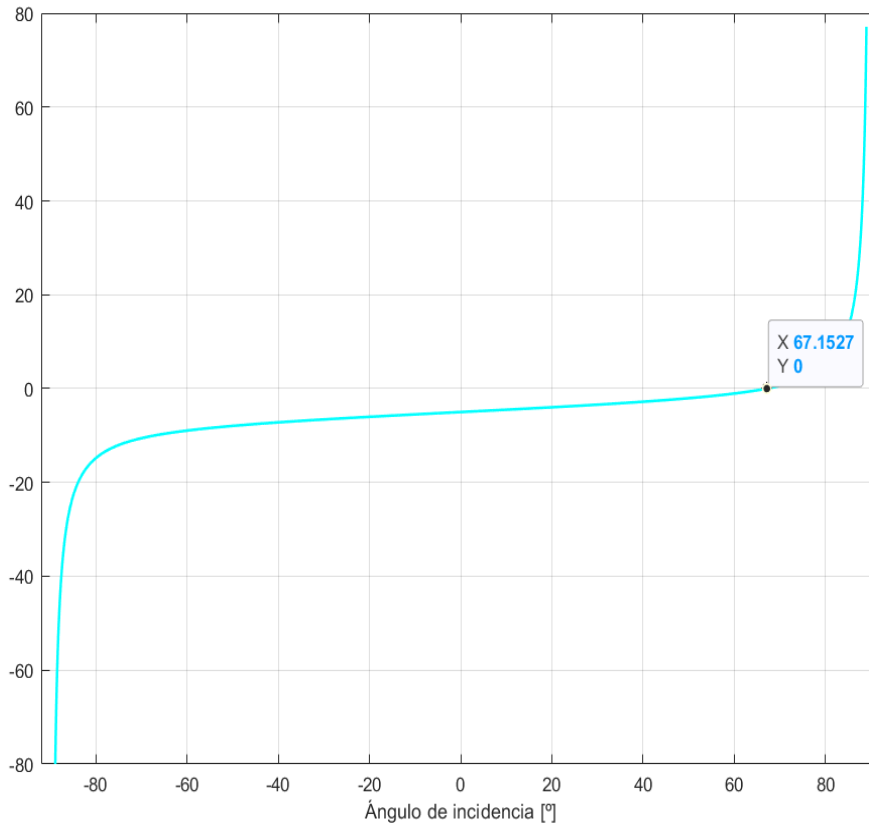


Figura 6.17 Raíz de la función para R=5 mm

Usando la función de MATLAB `fzero()` calculamos la raíz **cuando R vale 5 mm**. En la gráfica 6.17 observamos el valor del ángulo: 67.1527° . Este es el valor límite en cuanto a ángulo que nuestro sensor es capaz de leer. En este cálculo, nos hemos centrado solamente en las limitaciones físicas debido a las dimensiones de la cámara. Sin embargo, en la realidad, esto no es suficiente. Hay que tener en cuenta cómo funciona la cámara. En los límites de la matriz de píxeles no suele tener la precisión esperada y no toda la región está ocupada por píxeles activos que sean capaces de recoger la imagen y procesarla.

Este estudio está hecho sin entrar en detalle en la composición de la cámara, teniendo en cuenta el *coverglass* y el *gap* de vacío de la misma, el valor límite está en 63.7° .

Con estos cálculos no buscamos un resultado preciso, no queremos un estudio exhaustivo para saber con certeza el FOV que tendremos en las pruebas. La idea es hacer una estimación rápida para ver qué podemos esperar como resultado cuando probemos el UFSS. Por esto, se ha considerado que debemos reducir R un 50% para evitar estos problemas. Por lo tanto, suponemos que $R=2.5$ mm será el valor límite que marcará nuestro FOV.

Volvemos a hacer el mismo cálculo en MATLAB, pero con $R=2.5$, obteniendo un ángulo de 40° . Por lo tanto, el FOV estará en torno a los 80° .

6.4 Ensayos

Una vez listo el dispositivo de pruebas y hechos los cálculos necesarios para prever los resultados, estamos en condiciones de estudiar los ensayos que vamos a realizar.

En primer lugar, se toman varias fotos para comprobar la funcionalidad del sensor. Esto se hace tanto en el interior de una **sala blanca**, usando un simulador solar, como en el exterior, haciendo fotos directamente al sol.

Con estas pruebas iniciales intentamos ver qué problemas podemos tener en cuanto a saturación de la cámara, comprobar qué configuración de parámetros de exposición y ganancia nos viene bien para conseguir una imagen aceptable, ver algunos problemas ópticos, de montaje, etc.

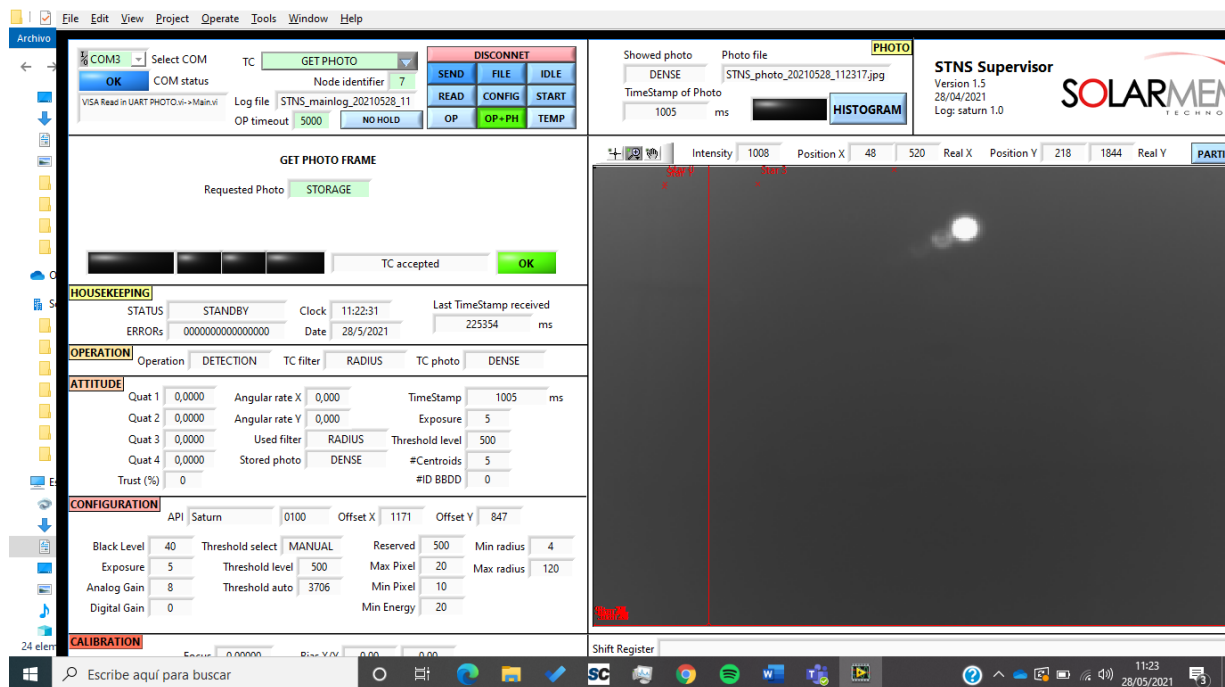


Figura 6.18 Foto al sol

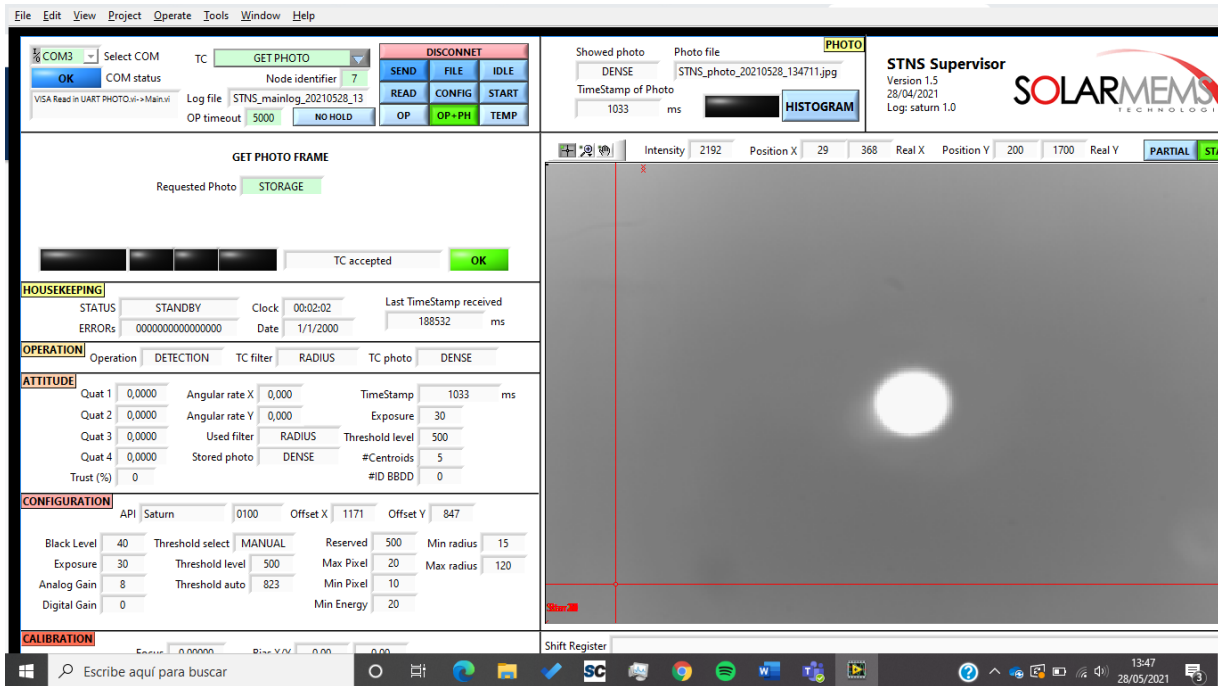


Figura 6.19 Foto en simulador solar

En las imágenes anteriores vemos una foto hecha al sol, en una prueba de exterior colocando el sensor en un trípode (figura 6.19), y una foto hecha en el simulador solar que hay en la sala blanca de Solar Mems (figura 6.20).

En las primeras fotos que se tomaron se podía ver claramente un **problema de saturación**, entraba demasiada luz, lo que dificultaba el trabajo del sensor a la hora de detectar el sol. Esto sucedía porque la pieza de acople de la óptica para el dispositivo de pruebas está hecha en una resina transparente, y había zonas por las que entraba la luz al sensor. Tapando los bordes de la óptica con un poco de cinta se consigue un resultado aceptable, mejorando mucho la imagen, sobre todo por los bordes, donde había demasiada claridad.

Otro problema que pudimos observar era la **aparición de reflejos del sol**. Si nos fijamos en la figura 6.19, podemos ver cómo cerca del sol hay dos o tres reflexiones del mismo. Solucionar este problema no es tan sencillo, sin embargo, jugando con los parámetros de la foto, se consigue que el efecto sea menor y que no llegue a afectar demasiado en el cálculo del centroide. El motivo de estas reflexiones puede ser, muy probablemente, por problemas de refracción de la luz en el filtro y en el coverglass, causados por algunos de los fenómenos no ideales mencionados en el apartado 3.4.

Por otro lado, en las primeras imágenes observamos que en la zona central del sol aparecía una **zona más oscura** que sí podía afectar a la hora de calcular el centroide. El parámetro de exposición nos permite eliminar parte del problema, aunque habría que hacer un estudio para ver qué origina este efecto y poder solucionarlo adecuadamente. Este problema es importante a la hora de poner el sensor a trabajar, porque el algoritmo que calcula el centroide no da buenos resultados cuando el sol se ve como un anillo en vez de como un círculo o elipse.

La aparición de esta zona central más oscura no es debida a nada relacionado con el sensor sino con la fuente de luz. El haz de luz que recibe el sensor no es colimado, sino que tiene una cierta difusión.

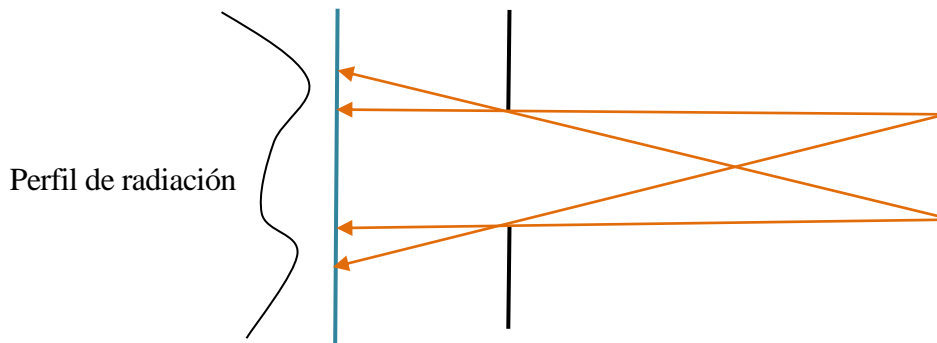


Figura 6.21 Esquema explicativo de la zona oscura

La difusión de la fuente de luz hace que el haz tenga un cierto ángulo, concentrando la radiación en la zona externa del pinhole. En la figura 6.21 se ha querido explicar mediante un esquema. En la derecha de la imagen tenemos la fuente de luz, que genera rayos que pasan por el pinhole hasta llegar a la cámara. En la figura se representan los rayos que pasan por el borde del pinhole, ya que estos son los que delimitan la zona de más luz. A la izquierda de la imagen se ha representado el perfil de radiación. Si lo observamos, vemos que en las zonas laterales el perfil es más alto, mientras que en la zona central hay un valle. Este valle explica la zona más oscura en el centro.

Además de estos problemas ópticos, aparecieron algunos como el reseteo aleatorio del sensor y errores de comunicación, que finalmente resultaron ser causados por un montaje mejorable de los cables de programación.

Una vez solventados lo mejor posible los problemas mencionados, nos disponemos a hacer los ensayos para ver cómo es el comportamiento del UFSS.

Finalmente, las pruebas se han hecho en el simulador solar de la sala blanca de Solar Mems. El motivo de hacer los ensayos aquí es que trabajar con el simulador es, además de sencillo, bastante práctico a la hora de colocar el sensor en una posición determinada. El hecho de que sea un equipo de sala blanca nos aporta también unas condiciones luminosas bastante buenas y un ambiente controlado que no afectará al comportamiento del equipo.

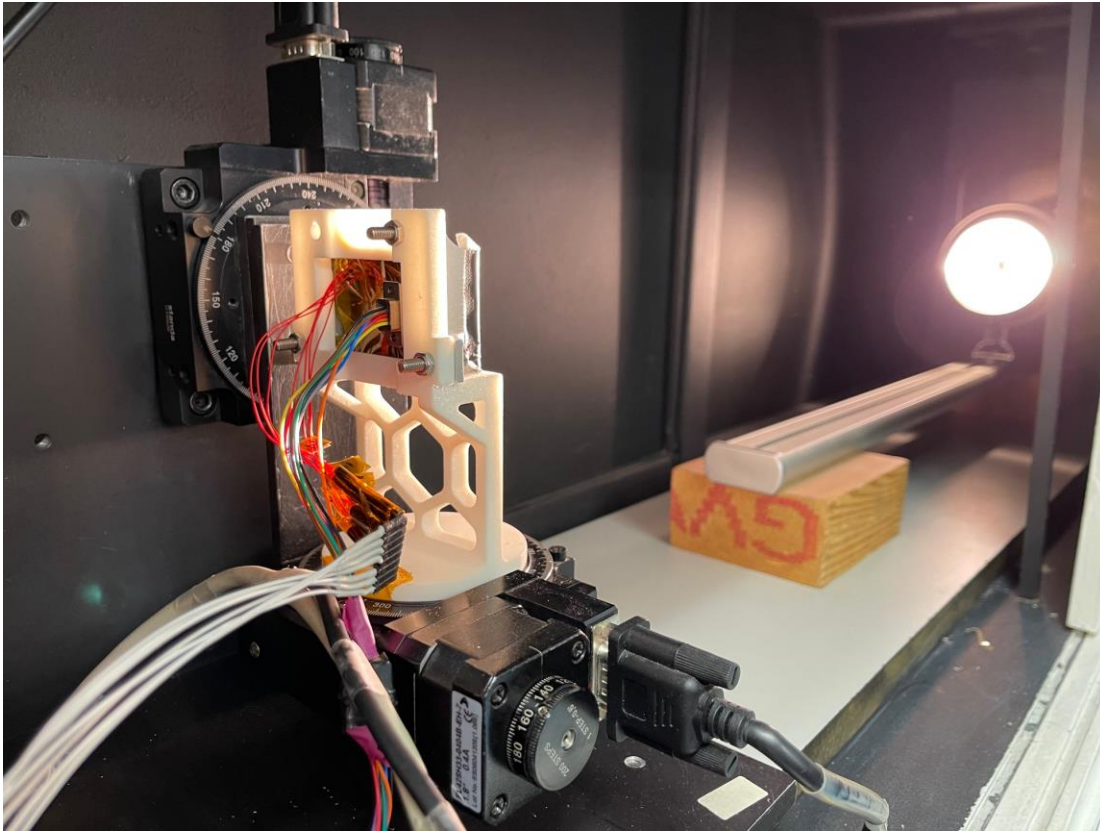


Figura 6.22 Foto trasera simulador

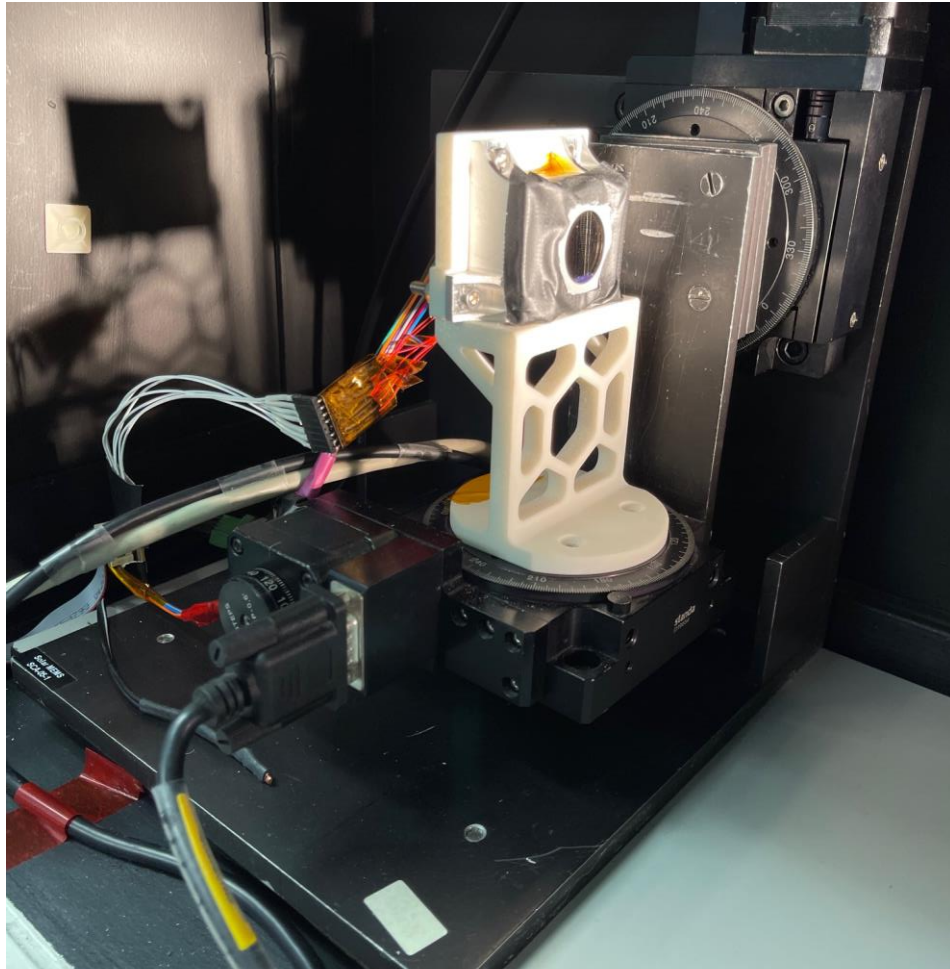


Figura 6.23 Foto delantera simulador

En la figura 6.21 vemos la parte trasera del sensor ya colocado dentro del simulador. La lámpara del fondo es la que hace las veces de sol, alumbrando el sensor para que este funcione. Por la parte trasera del sensor vemos los cables de programación, comunicación y alimentación, que están conectados al portátil para que podamos manejar el sensor usando la interfaz de pruebas descrita en el apartado 5.13.

En la figura 6.22 podemos ver mejor cómo está colocado el sensor en el simulador. El bracket de calibrado se atornilla en una base motorizada que nos permite girar en los ejes x e y el ángulo que pongamos en el ordenador que está conectado al simulador.

6.4.1 Pruebas y resultados

El ensayo principal consiste en colocar el sensor en unas combinaciones de ángulos determinadas, calcular el centroide y, usando la expresión 36, calcular el ángulo estimado para poder compararlo con el real.

En este punto, es importante recordar que el software de detección de centroides usado en el UFSS es el mismo que el del Star Tracker, por lo que, generalmente, el sistema detectará varios centroides. Modificando la configuración del sensor podemos conseguir que sólo se calcule un centroide.

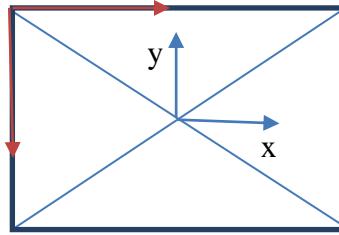


Figura 6.24 Sistema de referencia

El UFSS genera un documento de texto donde se recogen las coordenadas de los centroides calculados en píxeles. Este dato no es el que nosotros usamos finalmente en los cálculos porque el sistema de referencia de la cámara es distinto al de nuestro sensor (ver figura 6.24). Nuestra referencia se encuentra en el centro de la cámara, mientras que la del MT9P031 está en la esquina superior izquierda, por lo tanto, el píxel (0,0) no se encuentra en el origen de nuestro sistema de referencia.

El centro geométrico de la cámara está en el píxel (1296, 972), sin embargo, nuestra referencia se situará en el centroide calculado por el sensor para la posición inicial, donde el ángulo en x e y del calibrador es 0°. Solo en el caso ideal el centroide coincidirá con el centro geométrico de la cámara.

Tabla 5 Prueba en (0,0)

x	y
718,2	987,3
718,2	987,3
719,2	985,2
722,9	983,5
722,9	983,5
722,6	983
725,2	977,1
725,2	977,1
718,3	976,3
721,4	982,3

Como vemos en la tabla 5, para la posición inicial se han tomado varias medidas a las que finalmente se les ha calculado el promedio. El resultado obtenido es:

$$X = 721,4$$

$$Y = 982,3$$

Este centroide difiere del centro geométrico como ya adelantábamos. Esto puede deberse principalmente a que el pinhole no se encuentra exactamente en el centro, que el haz de luz no sea exactamente de 0° , que el rayo no es colimado, etc.

Es interesante hacer un estudio de repetitividad, porque si el resultado del sensor no es exacto pero sí es preciso (para una posición dada, todas las medidas dan valores muy similares), la corrección es sencilla.

Una forma rápida y sencilla de hacer este estudio es calculando la desviación típica de las medidas. Una desviación típica alta significa que los datos tienen una dispersión importante, lo que significaría que el comportamiento del sensor no es aceptable. Si la desviación típica es baja, los resultados arrojados por el UFSS son muy similares cuando repetimos las medidas, por lo que la precisión del sensor es buena.

La desviación típica de esta primera prueba es:

$$\sigma_x = 2,95^\circ$$

$$\sigma_y = 4,36^\circ$$

Los valores no son altos, pero podrían ser mejores.

Volvemos a tomar varias medidas en distintas posiciones. Hemos recorrido el eje x, tomando medidas en intervalos de $2,5^\circ$. Los resultados esperados deben mantener un valor constante para la coordenada y, mientras que la x irá variando de forma lineal.

El procedimiento es exactamente igual que para la posición inicial. Para una posición determinada, tomamos un conjunto de medidas, hacemos el promedio y calculamos la desviación típica para ver la dispersión de los datos.

Tabla 6 Pruebas

Ángulo	Promedio de x	Promedio de y	Desviación típica x	Desviación típica y
-22,5	1455,8	944,8	2,66	7,76
-20	1358,7	950,1	0,97	1,01
-17,5	1301,4	942,6	3,44	0,67
-15	1193,6	949,8	2,20	4,50
-12,5	1122,1	951,7	1,95	4,20
-10	1043,9	954,2	2,20	3,11
-7,5	962,7	958,6	1,18	3,87
-5	882,1	961	3,23	4,91
-2,5	800,8	968	2,65	3,81
0	721,4	982,3	2,95	4,36
2,5	643,2	949,3	2,14	1,67
5	561,1	946,7	2,23	3,50
7,5	484,1	951,2	1,65	2,20
10	402	948,1	2,00	3,21
12,5	320,3	954	1,19	3,57
15	241,7	956,2	3,03	4,10
17,5	157,1	951,9	2,15	3,18

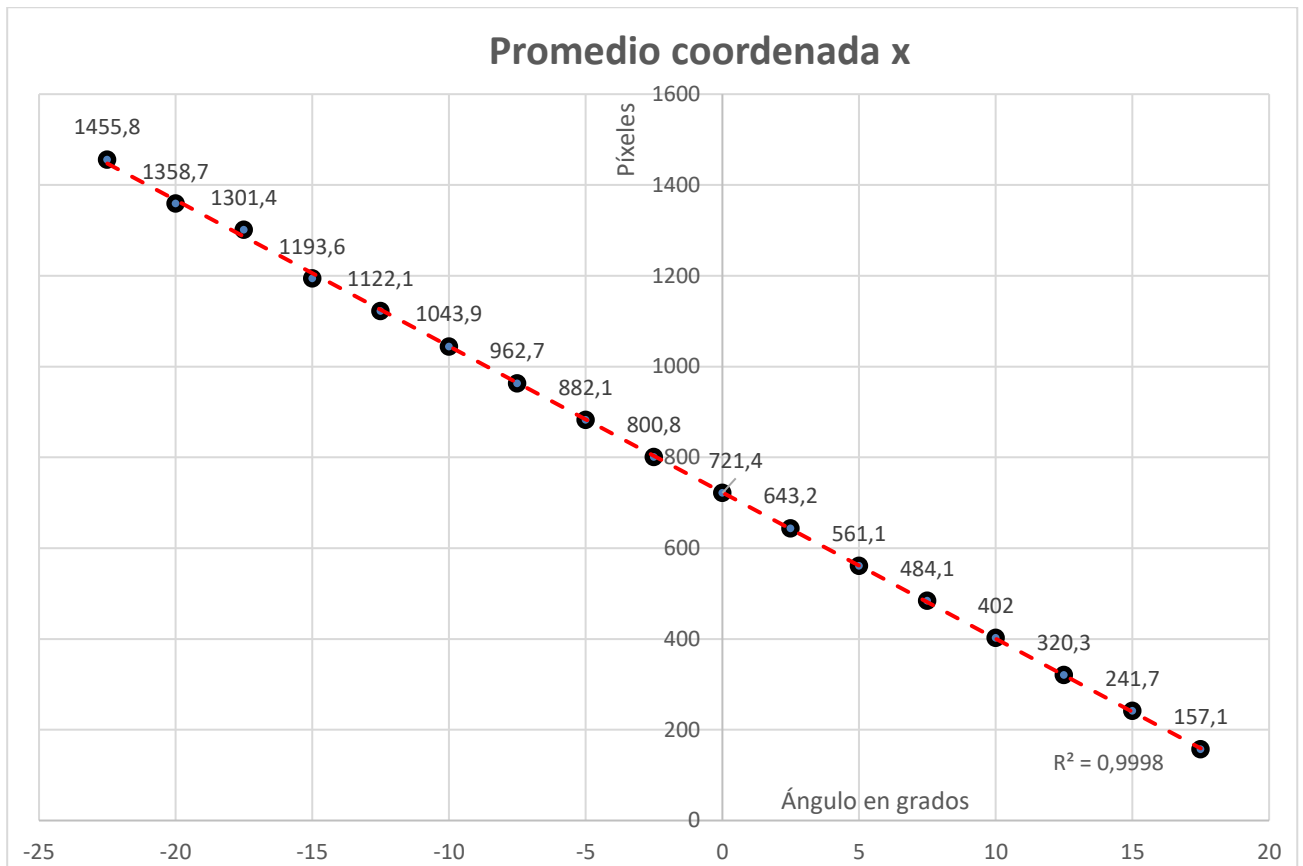


Figura 6.25 Promedio coordenada x

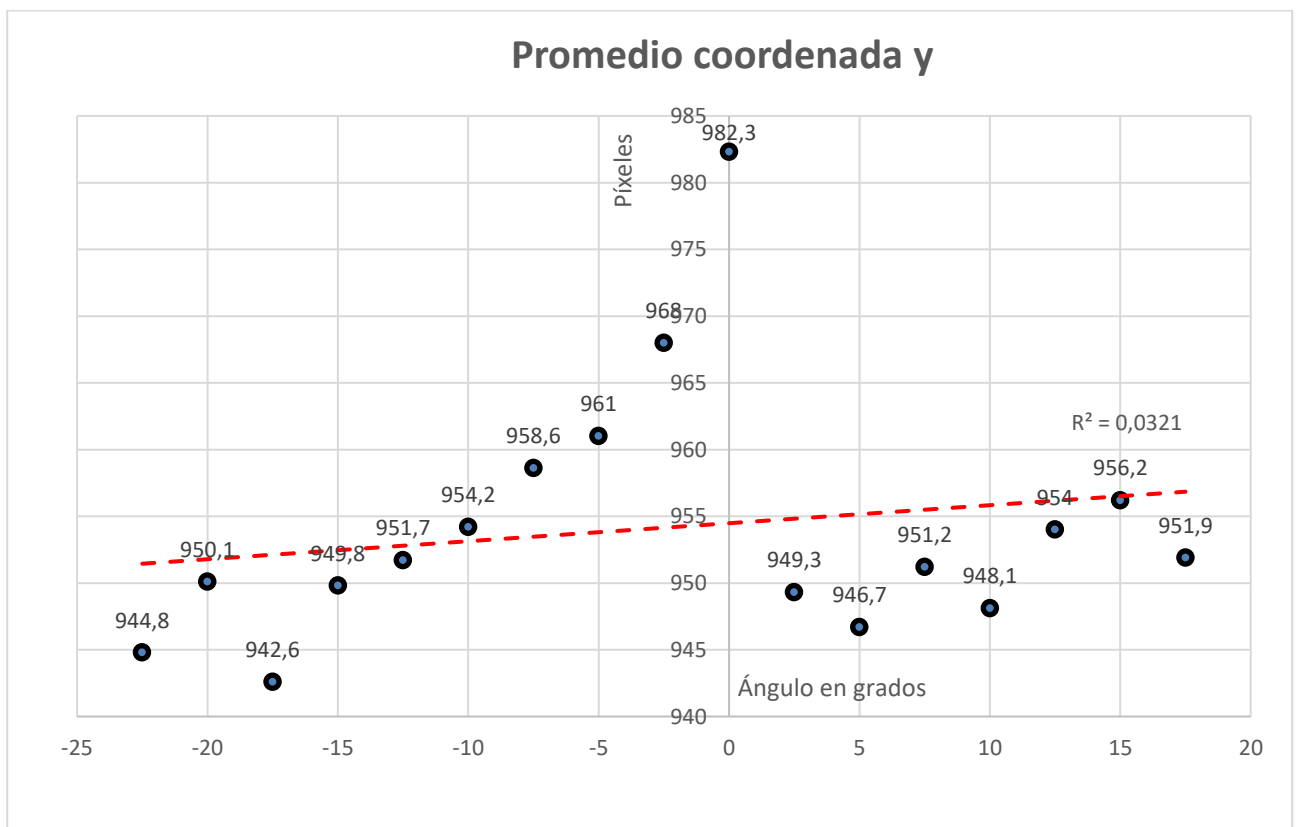


Figura 6.26 Promedio coordenada y

En la tabla 6 se recogen los resultados obtenidos al hacer un barrido en el eje x. En las figuras 6.25 y 6.26 se ha representado gráficamente el promedio de las medidas tomadas en cada una de las posiciones para poder estudiar la tendencia.

Como vemos, la coordenada x tiene un comportamiento bastante lineal, ciñéndose muy bien a la línea de tendencia y dejando un error cuadrático medio muy cercano a 1.

En cambio, el comportamiento de la coordenada y no es tan bueno, puesto que los valores no se acercan tanto a la línea de tendencia, dejando un error cuadrático medio mucho peor.

En cuanto a la repetitividad de las medidas no sacamos grandes conclusiones, el comportamiento es un poco aleatorio y no se aprecia relación con la posición del sensor. En general, la coordenada y tiene una mayor dispersión en comparación con la coordenada x.

En el estudio de la dispersión de los datos es muy utilizado el 3σ , ya que el 99.7% de las medidas estarán comprendidas en el intervalo $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$.

Por último, es interesante estudiar lo cerca que está el ángulo calculado a partir del centroide, con respecto al ángulo referencia de la posición del sensor en el calibrador. Para ello, implementamos el estudio de la óptica en MATLAB, con esto calculamos el ángulo y podemos comparar con la referencia. Sin embargo, esto es posible porque en estas pruebas sólo se ha barrido un eje y, en teoría, de los dos ángulos que debe calcular nuestro sensor (uno para cada eje) uno será nulo y el otro será el propio ángulo. En cambio, de forma general habría que realizar una comparación de ángulos para cada eje, de forma que tendríamos que descomponerlo.


```

5      %Centro teórico del sensor%
6      %cx=1296; % pixeles
7      %cy=972; % pixeles
8
9      cx=721.4;
10     cy=982.3;
11
12     %Coordenadas del centroide calculadas haciendo la media de los datos obtenidos%
13     %Pasamos a metros%
14     x_promedio = 241.7; %introducimos x de prueba
15     y_promedio = 956.2; %introducimos y de prueba
16     x= [x_promedio-cx]*2.2/1000;
17     y= [cy-y_promedio]*2.2/1000;
18
19     R=sqrt(x^2 + y^2); %distancia del centro al centroide
20     %Definimos la función que relaciona centroide con ángulo
21
22     fun= @(theta) 1.525*tan(theta)+2.6*tan(asin(sin(theta)/1.52))-R;
23
24     %Condición inicial
25
26     theta_0=0;
27
28     %Cálculo del ángulo
29
30     theta = fzero(fun,theta_0);
31     grados = rad2deg(theta);

```

Figura 6.27 Código de implementación del análisis óptico

Con este código calculamos en grados el ángulo a partir de la posición del centroide.

Tabla 7 Comparación ángulos y error absoluto

Ángulo referencia	Ángulo calculado	Error absoluto
-20°	-24.04°	4.04°
-15°	-18.09°	3.09°
-10°	-12.50°	2.5°
-5°	-6.30°	1.30°
5°	6.38°	1.38°
10°	12.40°	2.40°
15°	18.36°	3.36°

Como vemos en la tabla 7, el error absoluto es mayor cuando nos alejamos del centro de la cámara, esto concuerda con lo esperado porque el comportamiento del UFSS es peor cuanto más

cerca esté del borde de la cámara el centroide, como ya comprobamos.

7 CONCLUSIONES

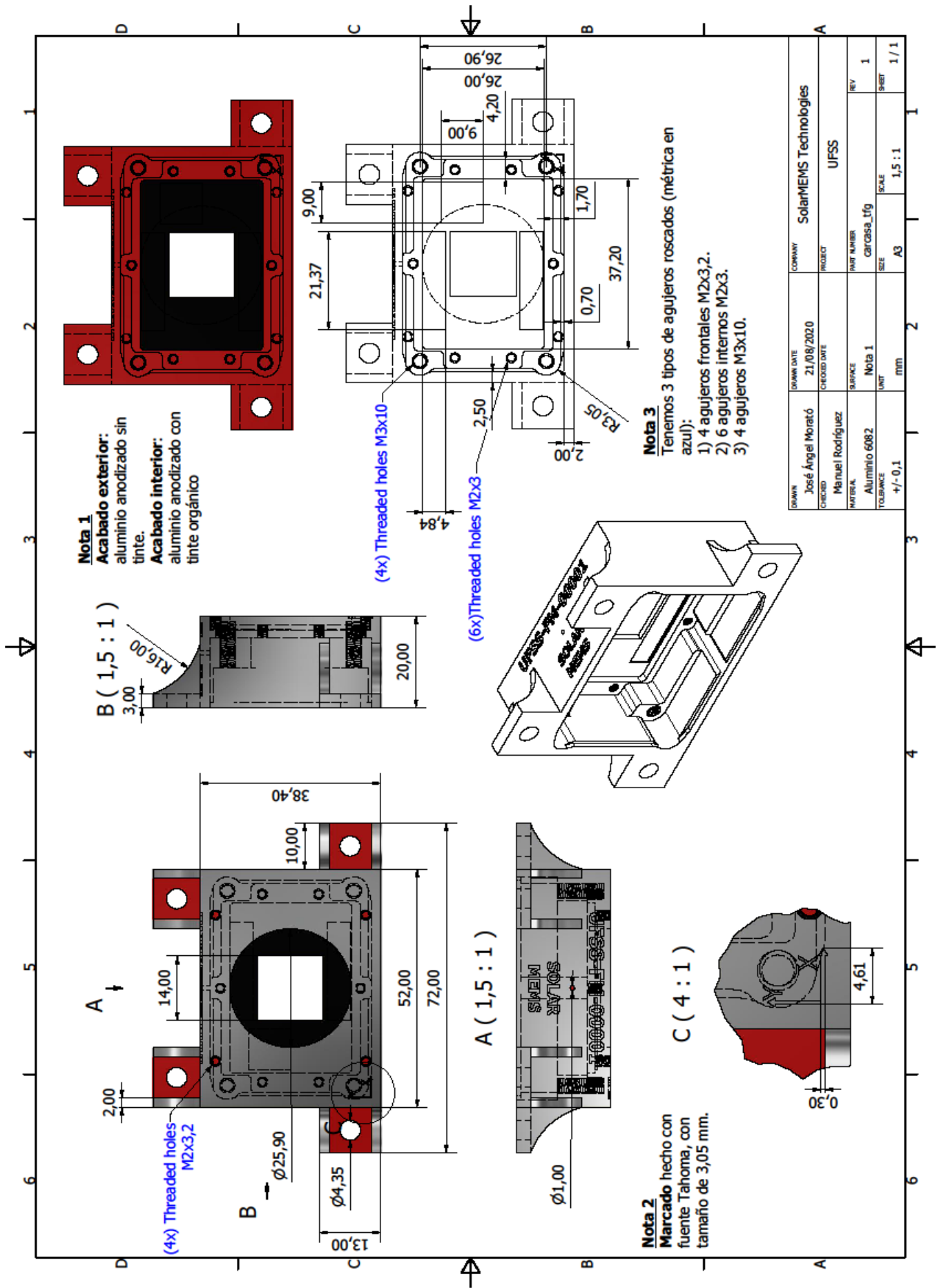
Hemos comprobado la funcionalidad del sensor, siendo capaz de captar la luz correctamente y calcular el centroide con una precisión mejorable.

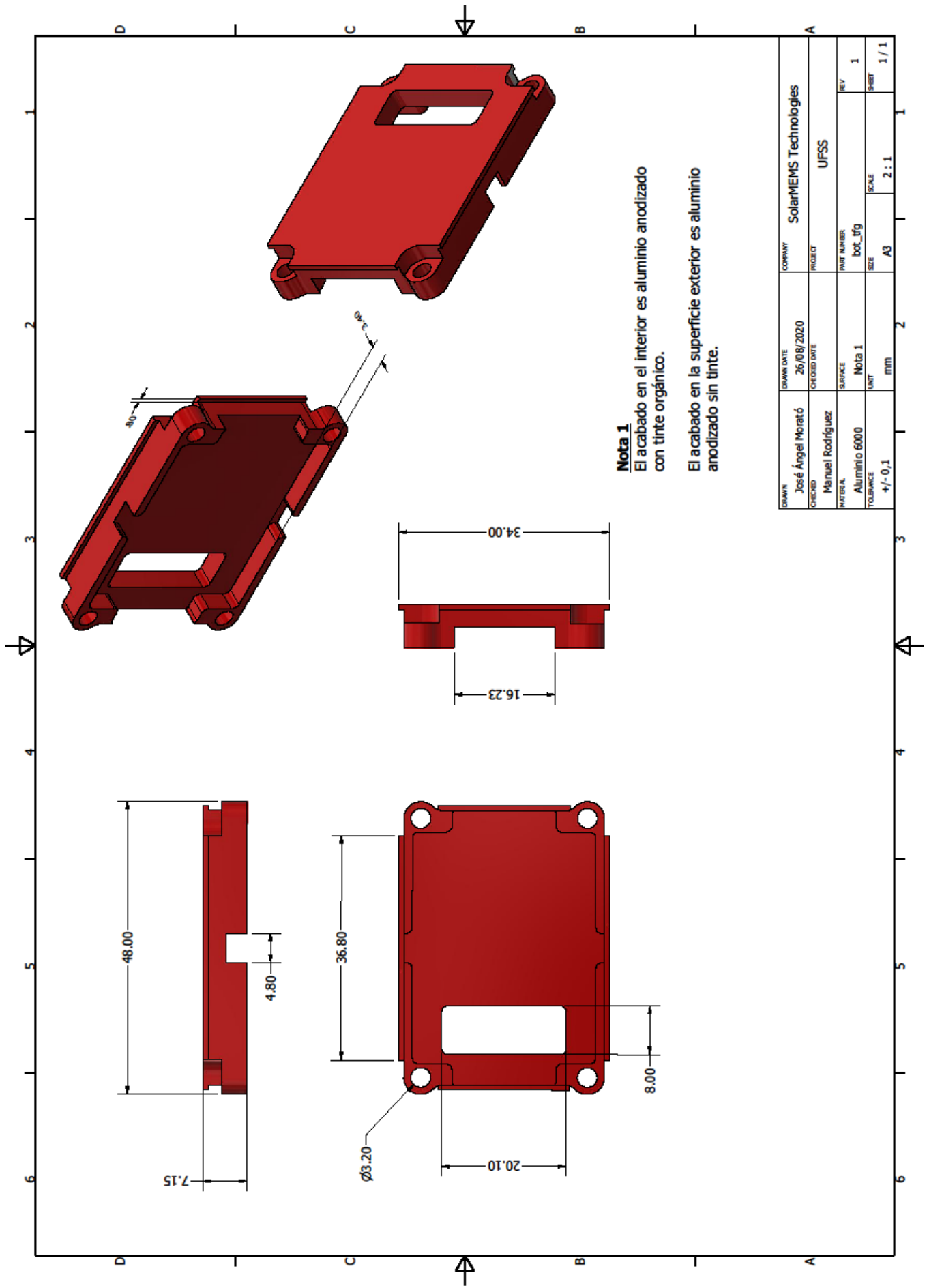
El prototipo de pruebas ha limitado la capacidad del sensor y la pieza de plástico ha añadido errores que, con una mejor fabricación, se podrán mejorar. Los resultados de las pruebas con el UFSS inicialmente diseñado, con la disposición óptica principal, sin adaptador de plástico, con los cristales correctamente fijados con pegamento, etc. serán mucho más cercanos a lo esperado. Además, el uso de un software especialmente depurado para el UFSS (en estas pruebas se han usado versiones del Star Tracker) mejorará aún más el comportamiento del mismo.

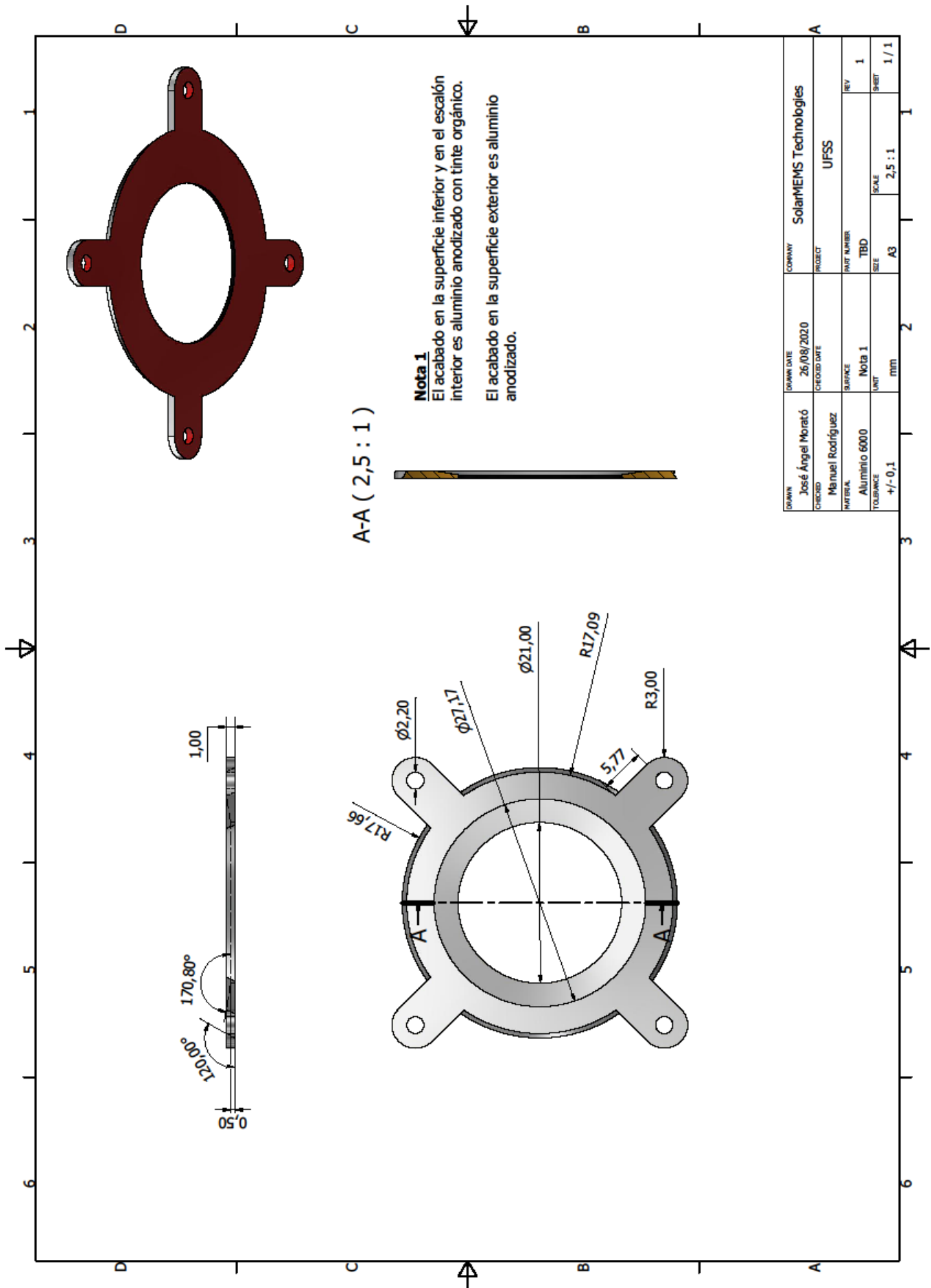
En las pruebas realizadas, además, nos encontramos con problemas con la fuente de luz del calibrador. El UFSS no solo captaba la luz sino que hacía una foto de lo que veía, esto hacía que se vieran sombras debido a la pieza que sujeta la luz del calibrador. Por lo tanto, tuvimos que cambiar la fuente de luz y usamos una luz led con un papel para que la fuente fuera más difusa. Además, cambiamos el coverglass para usar uno con un pinhole más pequeño, de diámetro $25\mu\text{m}$. Con estas modificaciones y modificando la configuración del sensor, conseguimos que funcionase correctamente y nos aportase los datos que hemos estudiado.

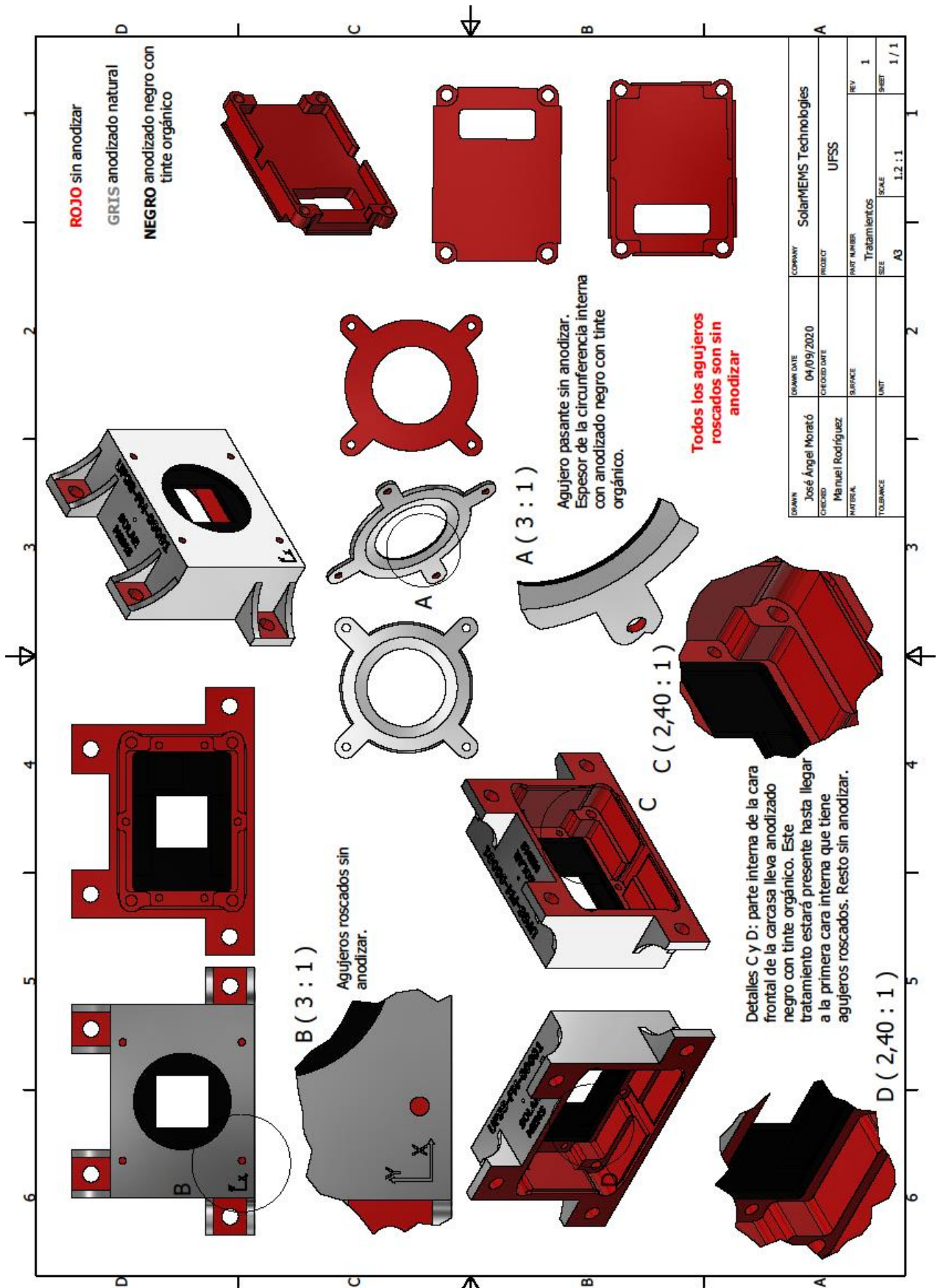
Sin duda, este primer prototipo es una buena base para seguir mejorando y conseguir un dispositivo preciso, fiable y rápido.

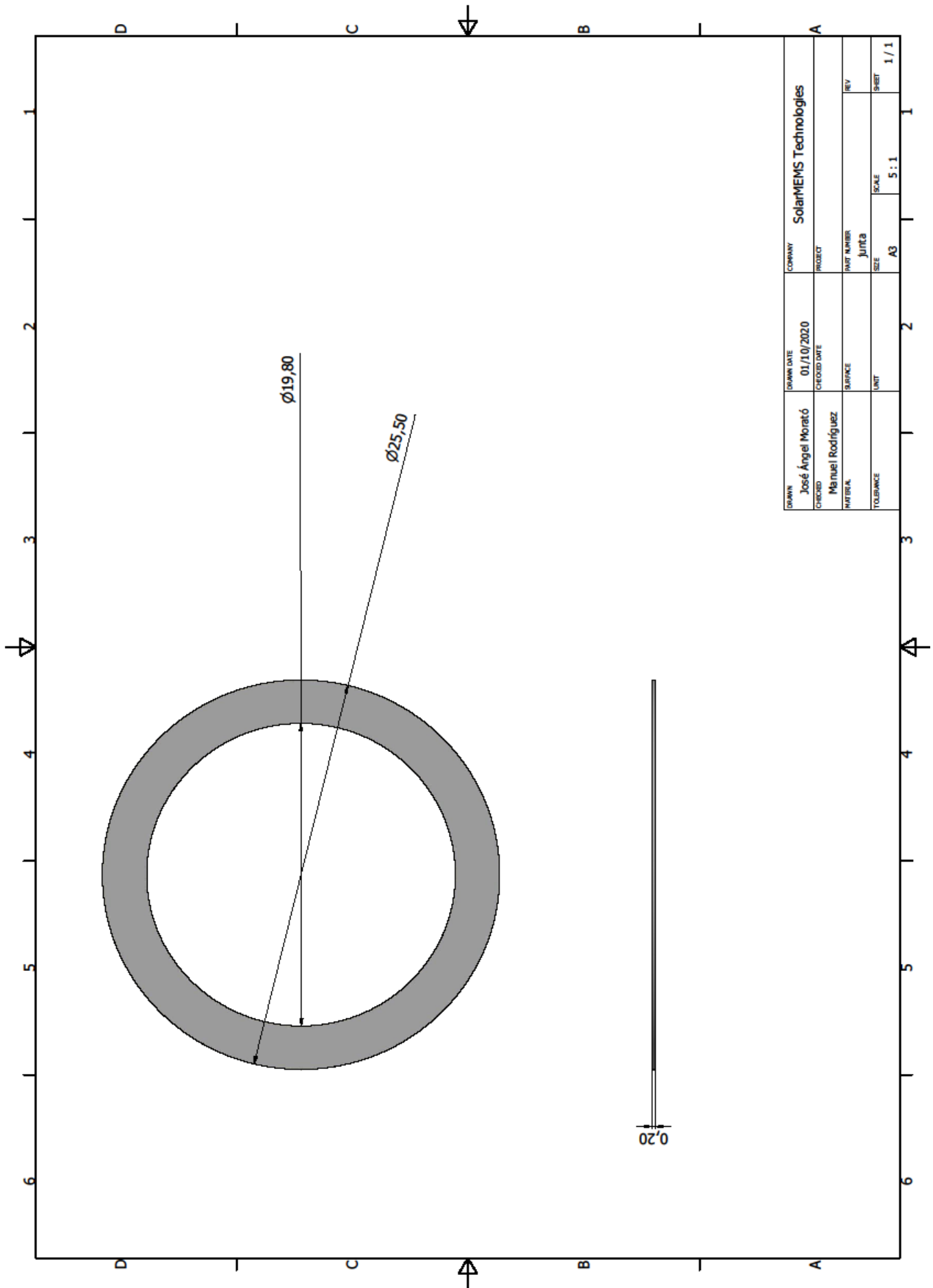
8 APÉNDICE A: PLANOS

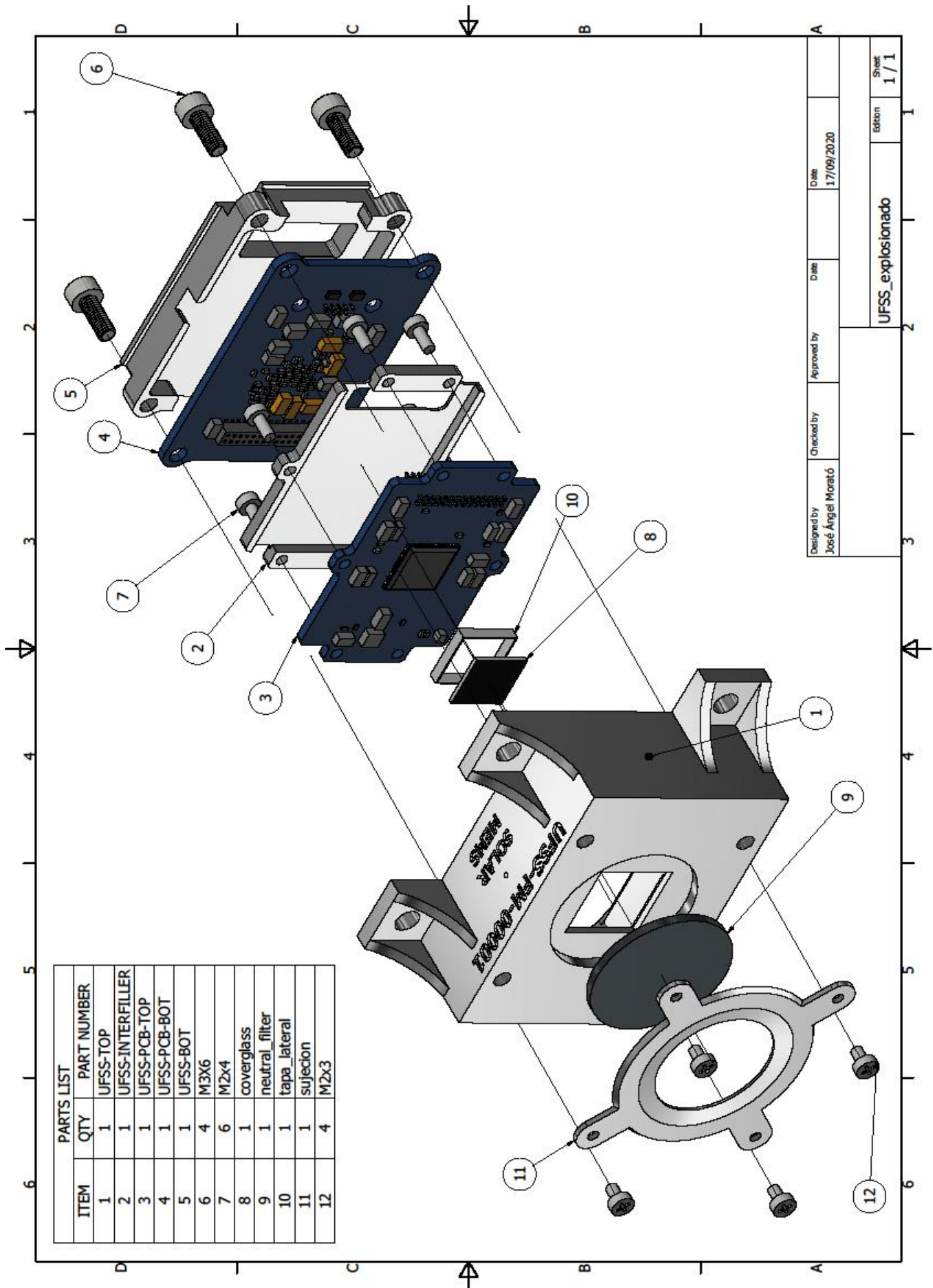




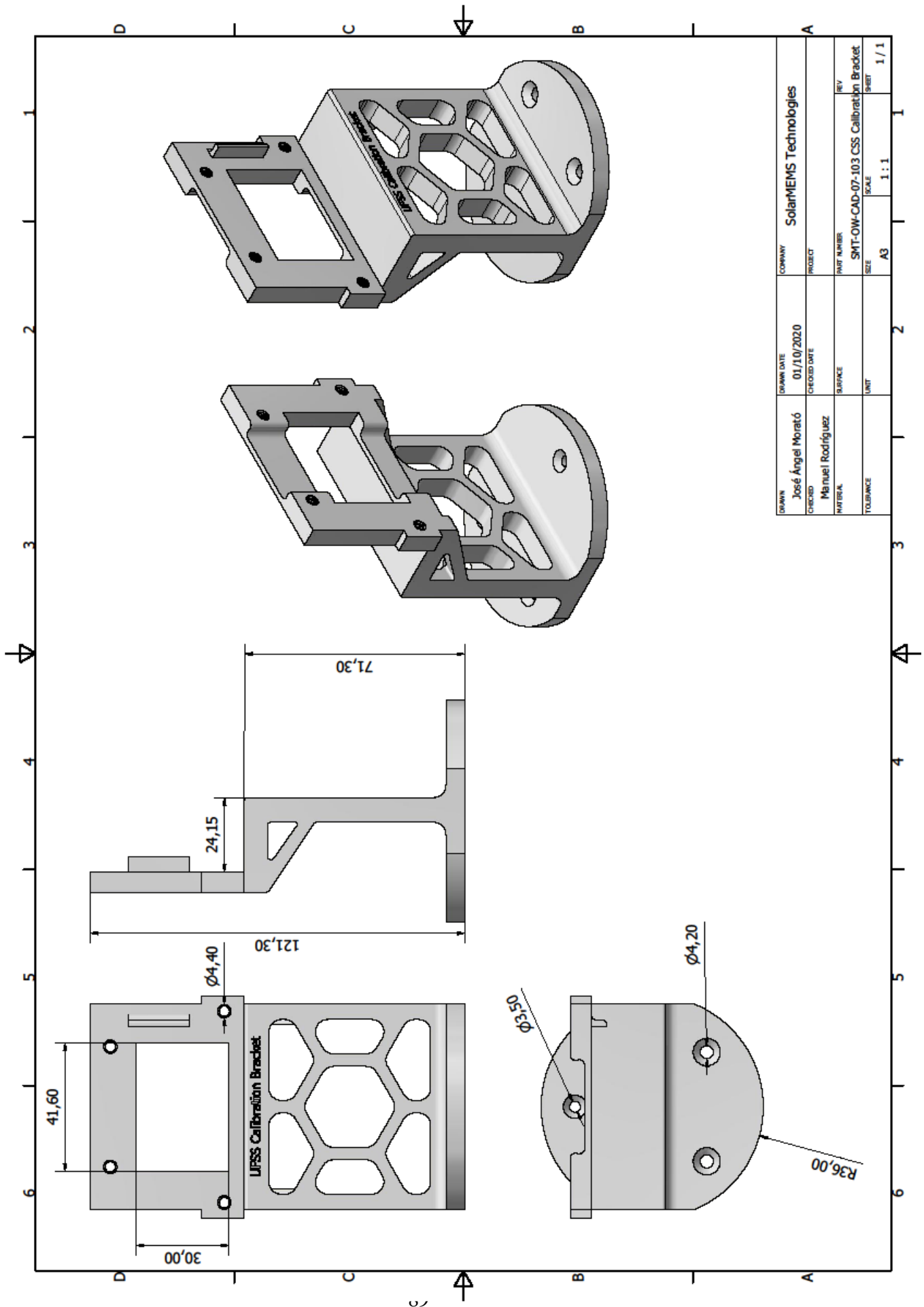








Designed by José Angel Morató	Checked by	Approved by	Date 17/09/2020
UFSS_explodonado			Edition 1 / 1



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Minsong Wei, Fei Xing, Zeng You, *A highly accurate wireless digital sun sensor based on profiled detecting and detector multiplexing technologies*, Mechanical Systems and Signal Processing 82 (2017).
- [2] Datasheet MT9P031: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MT9P031-D.PDF>
- [3] Documentación SmartFusion2:
<https://www.microsemi.com/product-directory/soc-fpgas/1692-smartfusion2#documentation>
- [4] Datasheet LM117QML 3-Terminal Adjustable Regulator de Texas Instruments:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117qml-sp.pdf?ts=1606380971308&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [5] Raúl García Rodrigo, *Design and Manufacturing of a Solar Tracker based on a Pinhole Camera for High Accurate Satellite Attitude Determination*, Trabajo Fin de Grado, ETSI US, 2019
- [6] Sensores CMOS: https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_CMOS
- [7] Diferencia CCD - CMOS. Canal Youtube David García Pérez. Vídeo:
<https://www.youtube.com/watch?v=eanGAiIAJ4Y&t=157s>
- [8] Funcionamiento de la FPGA: <https://www.digikey.es/es/articles/fundamentals-of-fpgas-part-3-getting-started-with-microchip-fpgas>

