

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

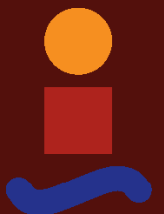
### Sistema de calibración de un sensor solar de cuatro cuadrantes

Autor: Jaime Reyes Guerrero

Tutor: Juan García Ortega

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

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

# **Sistema de calibración de un sensor solar de cuatro cuadrantes**

Autor:

Jaime Reyes Guerrero

Tutor:

Juan García Ortega

Profesor Titular

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

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado: Sistema de calibración de un sensor solar de cuatro cuadrantes

Autor: Jaime Reyes Guerrero  
Tutor: Juan García Ortega

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Agradecer a mis padres y a mi hermano por su apoyo incondicional. A mis amigos Alfonso, José y LuisCa por estar siempre ahí durante estos 4 años y por supuesto a mi tutor Juan por la comprensión, tutela y amabilidad en todo momento.

*Jaime Reyes Guerrero  
Sevilla, 2022*





# Resumen

---

**E**l objetivo de este trabajo es diseñar un sistema que permita el calibrado de sensores solares con fotodiodos de cuatro cuadrantes. Para lograrlo, se ha dividido el proceso en tres etapas: diseño de la estructura, adquisición de datos y control de incidencia luminosa.

En la primera etapa, se diseñará la estructura que permitirá la concentración de la fuente luminosa, así como la fijación del sensor a una base antivibraciones con el propósito de disminuir lo máximo posible las perturbaciones en el proceso de calibrado.

En la segunda etapa, se abordará la adquisición de datos del sensor que permitirá la conexión del mismo al sistema con el objetivo de obtener su respuesta eléctrica, lo que serviría tanto para su análisis como para utilizarla como realimentación del sistema de control.

En la tercera y última etapa, se realizará el control de la incidencia luminosa mediante un microposicionador XY de alta precisión y repetibilidad.

Todas las decisiones tomadas durante este proyecto tienen como fin último el diseño de un prototipo que permita definir los aspectos a tener en cuenta para el calibrado de este tipo de sensores, dando pie a futuras ampliaciones y avances tanto en diseños como en algoritmos y herramientas utilizadas.



# Abstract

---

The main goal of this assignment is to design a system that allows the calibration of for quadrants sun sensors. To achieve it, the process has been divided in three stages: structure's design, luminous incidence's control and data acquisition.

During the first stage, the structure that will allow the luminous source to be concentrated is going to be designed as well as a structure to fix the sensor to a low-vibrational table in order to reduce the perturbations in the calibration process.

During the second stage, the sensor's data acquisition process will be developed in order to obtain the electric response from the sensor to analyse it or to use it as a feedback for the control system.

During the third and last stage, the luminous incidence's control is going to be developed using a highly accurate monitorized XY scanning stage.

Every decision taken during this assignment has the ultimate goal of designing a prototype that allows to define the main aspects to calibrate this type of sensors empowering possible upgrades in every design, algorithm and tools used.



# Índice Abreviado

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del Arte	1
1.2 Motivación	4
1.3 Objetivo	5
1.4 Estructura	5
<b>2 Requerimientos</b>	<b>7</b>
<b>3 Diseño del sistema</b>	<b>9</b>
3.1 Descripción del sistema	9
3.2 Fuente de luz	10
3.3 Conducto de luz	11
3.4 Cubierta del posicionador	16
3.5 Base del sensor	19
3.6 Posicionador XY	21
3.7 Estructura total	23
<b>4 Adquisición de datos</b>	<b>25</b>
4.1 Sensor solar NANO-ISSX	25
4.2 Lectura de tensiones	27
4.3 MATLAB como método de adquisición de datos	28
<b>5 Programa principal</b>	<b>31</b>
5.1 Objetivos del programa principal	31
5.2 Interfaz gráfica	32
5.3 Método de búsqueda del cero	35
5.4 Barrido	38
5.5 Control del posicionador XY	42
<b>6 Resultados</b>	<b>45</b>
6.1 Resultados	45
6.2 Cumplimiento de los requerimientos	51

<b>7 Conclusiones</b>	<b>55</b>
<i>Índice de Figuras</i>	57
<i>Índice de Tablas</i>	59
<i>Índice de Códigos</i>	61
<i>Bibliografía</i>	63

# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Estado del Arte	1
1.1.1 Control de actitud	1
1.1.2 Sensores solares	2
1.1.3 Fotodiodos de cuatro cuadrantes	2
1.1.4 Caracterización de sensores solares	3
1.1.5 Calibrado y tests de sensores solares	3
1.2 Motivación	4
1.3 Objetivo	5
1.4 Estructura	5
<b>2 Requerimientos</b>	<b>7</b>
<b>3 Diseño del sistema</b>	<b>9</b>
3.1 Descripción del sistema	9
3.2 Fuente de luz	10
3.3 Conducto de luz	11
3.3.1 Análisis teóricos	12
Ángulo de apertura de salida	12
Efecto de la distancia al sensor en la proyección de la luz	13
Influencia del dimensionado en la iluminancia	14
3.3.2 Justificación	14
3.3.3 Diseño final	15
3.4 Cubierta del posicionador	16
3.4.1 Justificación	16
3.4.2 Diseño final	17
3.5 Base del sensor	19
3.5.1 Justificación	19
3.5.2 Diseño final	19
3.6 Posicionador XY	21
3.7 Estructura total	23
<b>4 Adquisición de datos</b>	<b>25</b>
4.1 Sensor solar NANO-ISSX	25
4.2 Lectura de tensiones	27
4.3 MATLAB como método de adquisición de datos	28

4.3.1	Implementación	28
<b>5</b>	<b>Programa principal</b>	<b>31</b>
5.1	Objetivos del programa principal	31
5.2	Interfaz gráfica	32
5.2.1	Adquisición de datos	33
5.2.2	Control del posicionador	33
	Modo manual	33
	Calibrado	34
	Barrido	34
5.2.3	Información adicional	34
5.3	Método de búsqueda del cero	35
5.3.1	Paso 1. Movimiento al punto P	36
5.3.2	Paso 2. Movimiento diagonal	36
5.3.3	Paso 3. Movimiento en el eje X	37
5.3.4	Paso 4. Movimiento en el eje Y	37
5.4	Barrido	38
5.4.1	Variación del ángulo de incidencia	38
5.4.2	Método del barrido	38
	Paso 1. 60° en ambos ejes	40
	Paso 2. Aumento o disminución del ángulo en el eje Y	40
	Paso 3. Aumento del ángulo en el eje X	41
	Iteración	41
5.5	Control del posicionador XY	42
5.5.1	XILab	42
5.5.2	MATLAB	43
	Comunicación posicionador-MATLAB	43
	Configuración del posicionador	43
	Control de movimiento	44
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>45</b>
6.1	Resultados	45
6.1.1	Resultados de la calibración	45
6.1.2	Resultados del barrido	48
6.2	Cumplimiento de los requerimientos	51
6.2.1	Intensidad luminosa	51
6.2.2	Integración	51
6.2.3	Interfaz gráfica	51
6.2.4	Representación en tiempo real	51
6.2.5	Calibración	52
6.2.6	Barrido	52
6.2.7	Límites de movimiento	52
6.2.8	Fichero de texto del barrido	52
6.2.9	Tabla resumen	53
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
	<i>Índice de Figuras</i>	57
	<i>Índice de Tablas</i>	59
	<i>Índice de Códigos</i>	61
	<i>Bibliografía</i>	63



# Notación

---

$\frac{dx}{dy}$	Derivada de $x$ respecto de $y$
$\cos$	Función coseno
$\tan$	Función tangente
$\tan^{-1}$	Función arco tangente
$\pm$	Más menos
$\in$	Pertenece a
$V$	Voltios
$\mu m$	Micras
$x^\circ$	Notación de grado, $x$ grados.
$>$	Mayor que
$<$	Menor que
$\frac{a}{b}$	Fracción con estilo pequeño, $a/b$



# 1 Introducción

---

En este capítulo se realizará un análisis del estado del arte de las tecnologías asociadas a los sensores solares, sus aplicaciones y su calibrado, así como se concretará la motivación del trabajo, los objetivos y la estructura del mismo.

## 1.1 Estado del Arte

### 1.1.1 Control de actitud

Los satélites artificiales son la base del funcionamiento de una inmensidad de tecnologías actuales. Desde el primer satélite espacial, Sputnik I, puesto en órbita por la Unión Soviética en 1957, se estima que alrededor de 8900 satélites han sido lanzados al espacio por diferentes países, la mayoría con la intención de orbitar la Tierra.

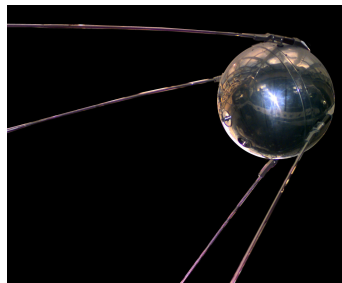


Figura 1.1 Sputnik I.

A pesar de que los satélites puedan tener distintas funcionalidades (meteorológicos, de comunicación, de navegación, astronómicos, etc.), existe algo fundamental en todos ellos: el control de actitud.

La actitud de un vehículo espacial (tripulado o no tripulado) se define como la orientación del mismo respecto a un sistema de referencia [4]. Para conseguir controlar dicha orientación se requiere de sensores que sean capaces de obtener la actitud o la posición del vehículo a partir de una magnitud física, actuadores que permitan modificar la orientación y algoritmos que permitan convertir la información de los sensores en una señal de actuación. Existe todo un campo dedicado al estudio de la integración de estos sensores, actuadores y algoritmos, denominado Sistema de Navegación, Guiado y Control (GNC).

Se puede ver en [4] que existen distintos tipos de sensores que permiten obtener la actitud de un vehículo espacial, destacando entre ellos los rastreadores de estrellas (*star trackers*), sensores de horizonte, magnetómetros, giroscopios y sensores solares, siendo este último en el que reside el interés de este trabajo.

### 1.1.2 Sensores solares

Los sensores solares son dispositivos que permiten obtener el ángulo de incidencia de los rayos solares que recibe un vehículo espacial. A partir de esto, es posible conocer la posición y/o actitud del vehículo en el que este se encuentre a bordo, aspecto fundamental en los sistemas de posicionamiento. Existen tres tipos principales de sensores solares: *Coarse sun sensors* (CSSs), *Fine analog sun sensors* (FASSs) y *Fine digital sun sensors* (FDSSs). La diferencia entre ellos está en cómo proporcionan la información del ángulo de incidencia de los rayos solares y en sus estructuras.

Los FASSs contienen fotodiodos que se ven excitados por los rayos solares, produciendo una corriente eléctrica proporcional al ángulo de incidencia de los mismos. Existen diferentes estructuras en las que los *arrays* de fotodiodos se utilizan en este tipo de sensores: parejas de fotodiodos triangulares [9], combinación de fotodiodos triangulares y rectangulares para eliminar dependencias ambientales [7] y fotodiodos de cuatro cuadrantes [5], entre otros.

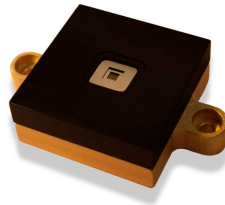


Figura 1.2 SSOC-A60 de Solar MEMS.

### 1.1.3 Fotodiodos de cuatro cuadrantes

Los dispositivos que presentan fotodiodos basan la medida del ángulo de incidencia en la cantidad de área iluminada por el rayo solar incidente. Existe una cubierta metálica o de cristal con una apertura, a través de la cual, el rayo es capaz de proyectar una sombra en cada fotodiodo, iluminando una parte del área de cada uno de ellos.

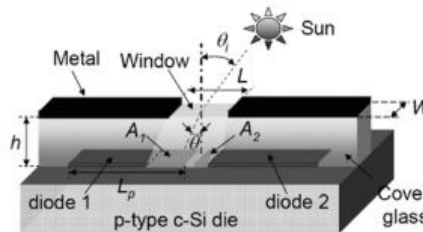


Figura 1.3 Esquema de medida del ángulo de incidencia [15].

A partir del modelo desarrollado en [5], el ángulo de incidencia  $\theta$  se puede calcular, para un fotodiodo de cuatro cuadrantes, a partir de la expresión:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{2 \cdot H \cdot L \cdot J_L} \right) \quad (1.1)$$

Siendo  $I_i$  la fotocorriente generada por el fotodiodo  $i$ ,  $J_L$  la densidad de corriente generada por el rayo solar,  $H$  la altura a la que se encuentra la apertura respecto a los fotodiodos y  $L$  el tamaño del lado de cada fotodiodo. Las fotocorrientes han debido sumarse por parejas con el fin de obtener una señal de error correspondiente a la desviación angular en un eje [5].

Cuando el rayo solar es perpendicular al sensor, las fotocorrientes serán iguales para cada uno de los fotodiodos. Debido a que las fotocorrientes son proporcionales al área iluminada, en el caso de que el rayo sea perpendicular, este área será idéntica en cada uno de los fotodiodos.

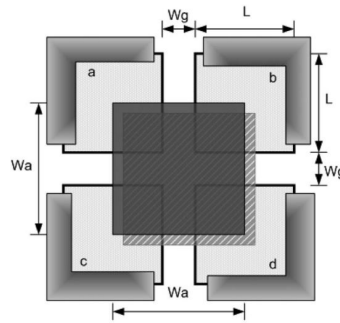


Figura 1.4 Layout de un fotodiodo de cuatro cuadrantes [5].

Esto se puede verificar con la expresión 1.1, en la que, para las cuatro fotocorrientes de igual valor, se obtiene un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ , es decir, variación nula respecto al vector normal al sensor.

#### 1.1.4 Caracterización de sensores solares

La caracterización permite obtener un modelo o ecuación característica del comportamiento de un sensor. Además, con la caracterización es posible determinar las propiedades más importantes de un sensor como la resolución, precisión, linealidad, rango dinámico, etc.

Las características que definen principalmente el desempeño de un sensor solar son el ángulo de visión (FOV) y la precisión, además de otras propiedades como el peso, tamaño o formato de los datos.

Uno de los objetivos principales de la caracterización de los sensores solares basados en fotodiodos es determinar el propio comportamiento de los fotodiodos. Como el fin de estos sensores es obtener el ángulo de incidencia de los rayos solares, mediante la caracterización se buscará obtener la relación existente entre este ángulo de incidencia y la medida proporcionada por el sensor.

Los métodos de caracterización utilizados en sensores de *tracking* solar normalmente consisten en modificar los ángulos de incidencia de la fuente de luz con el objetivo de obtener la respuesta del sensor ante dichas modificaciones [18][11]. Esto permite determinar los parámetros importantes del sensor, ya mencionados, además de detectar posibles errores que puedan ser solucionados mediante la calibración.

#### 1.1.5 Calibrado y tests de sensores solares

Los dispositivos microelectrónicos se ven expuestos a una gran variedad de ambientes durante su vida útil.

Por un lado, la fabricación de este tipo de dispositivos requiere de técnicas complejas. Procesos estándares presentes en tecnologías de semiconductores como el silicio, metalización de cristales [15] y diseño de dispositivos MOEMS (*micro-opto-electro-mechanical systems*) [6] son utilizados en la mayoría de los sistemas de fabricación de sensores solares. Las tolerancias existentes en el proceso de fabricación, el posible desalineamiento de las distintas partes, así como la diferencia en las propiedades eléctricas que puedan existir en los elementos de estos dispositivos, son fuentes de inexactitud que pueden alterar el comportamiento del sensor. Por tanto, el calibrado de los sensores solares es crucial para poder corregir las desviaciones existentes que alejan al sensor de su funcionamiento ideal.

La calibración de sensores solares permite, a partir de la medida obtenida del ángulo de incidencia, determinar los errores existentes, así como los coeficientes de corrección necesarios para garantizar una medida fiel [21], subsanando las imperfecciones del diseño.

El proceso de calibrado de este tipo de dispositivos requiere de instrumentación de altas prestaciones que permitan conocer y variar el ángulo de incidencia del rayo de luz con el objetivo de contrastar con los resultados proporcionados por el sensor. *High Accurate Angular Positioning System* (HAAPS) es el nombre que reciben este tipo de equipos.



Figura 1.5 HAAPS [15].

Los HAAPS basan su funcionamiento en dos motores paso a paso cuyos ejes cortan en el centro del sensor. La alta precisión de estos motores (de  $0.01^\circ$ ) permite un control exacto de la incidencia del rayo de luz.

Antes de comenzar con el proceso de calibrado, se deben asegurar unas condiciones de irradiancia estándares AM0 ( $1366W/m^2$ ) con la ayuda de una pequeña célula solar. Una vez se está en esta situación, comienza el proceso de calibrado.

Para obtener datos suficientes como para detectar los posibles errores del sensor, la tabla de posicionamiento se desplaza realizando un barrido dentro del campo de visión (FOV) con un paso de  $5^\circ$ , modificando el ángulo en ambos ejes.

Este método de calibración permite obtener los valores de tensión de los cuatro fotodiodos del sensor correspondientes a un ángulo concreto en una matriz o fichero de texto para su posterior análisis con el objetivo de realizar un análisis estadístico de los resultados: cálculo de error máximo, promedio de la precisión, valor  $3\sigma$ , etc.

Por otro lado, los dispositivos utilizados en ambientes espaciales deben ser diseñados para asegurar su correcto funcionamiento en un entorno donde son muchos los factores que pueden alterar el comportamiento de la microelectrónica [17]:

- Efectos térmicos: los vehículos espaciales reciben energía térmica a través de la radiación solar y la radiación de onda larga saliente (OLR) que emite la Tierra. Las temperaturas extremas provocan efectos adversos en el desempeño de los sistemas MEMS, ya sea por su erróneo funcionamiento o por la variación de las prestaciones.
- Efectos mecánicos: durante las fases de despegue, despliegue y durante la órbita, las aceleraciones, vibraciones y choques mecánicos, pueden afectar a las funcionalidades de los dispositivos o incluso producir daños irreparables.
- Efectos químicos: los ambientes de alta humedad, la desgasificación, la corrosión, etc., son factores que condicionan el funcionamiento de los dispositivos a bordo.

Los sensores solares son sometidos a diversos *tests* mecánicos, térmicos, de vacío y de radiación, entre otros, con el objetivo de evaluar la esperanza de vida y asegurar que estén cualificados para ser utilizados cumpliendo con los requisitos estándares [14].

## 1.2 Motivación

Los sensores solares son utilizados en multitud de tecnologías hoy en día más allá del sector espacial [13].

Las energías renovables son empleadas cada vez más en el abastecimiento energético de las ciudades, siendo la energía solar donde reside la principal aplicación de este tipo de sensores. Ser capaces de mejorar la eficiencia solar es fundamental para seguir avanzando en la lucha del cambio climático, así como en el aprovechamiento energético.

Por otro lado, los sensores solares también pueden ser muy útiles en áreas alejadas de la obtención de energía. Es el caso de los vehículos del sector aeronáutico, automoción, defensa, etc., donde los sensores

solares podrían permitir implementar sistemas de posicionamiento o sistemas de control térmico, fundamentales en aplicaciones de navegación autónoma y en el confort medioambiental, respectivamente.

Es por esto que el entendimiento, el estudio y la investigación de sensores solares son cruciales para seguir avanzando en las tecnologías actuales e incluso encontrar nuevas áreas donde los sensores solares puedan ser de utilidad.

La caracterización de los sensores solares es fundamental para la obtención de sus propiedades principales y asegurar un correcto cumplimiento de los requerimientos. Por tanto, el diseño de sistemas que permitan la caracterización y calibrado es tan importante como un buen proceso de fabricación del sensor.

Respecto a este último, tras una revisión del estado del arte, se ha observado una gran tendencia por el uso de tecnologías MEMS en el diseño de los sensores solares. Fue en torno a 1980 cuando se comenzaron a diseñar dispositivos que adoptaban esta tecnología [17], dando los primeros pasos hacia una gran miniaturización de los dispositivos, aspecto crítico en las aplicaciones espaciales.

Por tanto, las principales motivaciones de este trabajo son: el actual interés del autor por la instrumentación electrónica espacial, contribuir al conjunto de tecnologías existentes relacionadas con los sensores solares y presentar el funcionamiento de un sistema de calibración a partir del desarrollo de un prototipo funcional.

### 1.3 Objetivo

Con el desarrollo de este trabajo se pretende diseñar un sistema que permita la el calibrado y la posterior caracterización de un sensor solar partiendo únicamente de un posicionador XY cuyas características y control se especificarán en posteriores capítulos. Para poder alcanzar este objetivo, será necesario la realización de distintas tareas:

En primer lugar, se deberán diseñar todas las estructuras físicas que sean necesarias para la correcta excitación del sensor, utilizando materiales asequibles y accesibles, además de justificar las estrategias de diseño.

En segundo lugar, será necesario obtener la respuesta eléctrica del sensor ante la variación de la incidencia luminosa que este reciba, permitiendo así percibir el comportamiento del sensor.

En tercer lugar, el control de la posición de la incidencia luminosa deberá ser preciso y modificable, existiendo modos manuales y automáticos.

En cuarto lugar, la existencia de una interfaz gráfica que permita observar todos los parámetros del sistema será crucial para integrar toda la información. Esta debe permitir observar en tiempo real la respuesta del sensor, así como la posición de la fuente luminosa, con diferentes modos de control y de manera *user-friendly*.

Por último, este trabajo debe asegurar la repetibilidad del calibrado para, al menos, sensores solares del mismo modelo al utilizado. Además, se le dará una gran importancia a la posibilidad de continuación del trabajo en búsqueda de aplicar el sistema a otros modelos de sensores, desarrollar algoritmos de calibrado o cualquier otra posible ampliación. Para ello, deberá garantizarse el acceso total al sistema de control diseñado, así como a las funciones de cada una de las partes del sistema.

### 1.4 Estructura

El trabajo ha sido estructurado de la siguiente forma:

- Requerimientos: en el Capítulo 2 se presentarán los requerimientos a cumplir por el sistema.
- Diseño del sistema: en el Capítulo 3 se describirán las distintas partes que conforman el sistema de calibrado, profundizando en sus funciones y presentando una justificación del diseño y elección de los elementos.

- Adquisición de datos: en el Capítulo 4 se concretará el método de adquisición de datos utilizado para obtener la respuesta del sensor, así como se especificará el sensor solar a calibrar.
- Programa principal: en el Capítulo 5 se describirá el funcionamiento del programa desarrollado para el calibrado del sensor, así como el control del posicionador utilizado.
- Resultados y conclusiones: en los Capítulos 6 y 7 se analizarán los resultados obtenidos contrastándolos con los requerimientos y se presentarán las conclusiones extraídas acerca del trabajo.



## 2 Requerimientos

---

En este capítulo se presentarán todos los requerimientos que debe cumplir el sistema diseñado con el objetivo de que se compruebe cuales de ellos han podido ser cumplidos en el Capítulo 6.

1. **Intensidad luminosa:** La fuente de luz deberá tener suficiente intensidad luminosa como para conseguir un valor de tensión suficiente en los fotodiodos.
2. **Integración:** El sistema deberá integrar la información existente lo máximo posible, buscando el uso de un único *software* que gobierne todos los procesos.
3. **Interfaz gráfica:** El sistema deberá estar acompañado por una interfaz gráfica que permita al usuario tomar decisiones en el proceso de calibración.
4. **Representación en tiempo real:** El sistema deberá representar en tiempo real la evolución de la tensión de los fotodiodos, su valor instantáneo y las coordenadas del posicionador.
5. **Calibración:** El sistema deberá permitir obtener el cero del sensor solar.
6. **Barrido:** El sistema deberá permitir realizar un barrido modificando el ángulo de incidencia de la luz en todo el campo de visión del sensor solar.
7. **Límites de movimiento:** El movimiento del posicionador deberá estar limitado para evitar posibles colisiones con las estructuras que sirven de base al sensor.
8. **Fichero de texto del barrido:** Se deberá obtener un fichero de texto que recoja los ángulos incidentes y las tensiones de los cuatro fotodiodos del sensor durante el barrido.



## 3 Diseño del sistema

---

En este capítulo se describirán los distintos elementos que conforman el sistema de calibración del sensor solar. Se especificará la función de cada uno de ellos, así como las dimensiones, materiales y herramientas utilizadas para su diseño y fabricación.

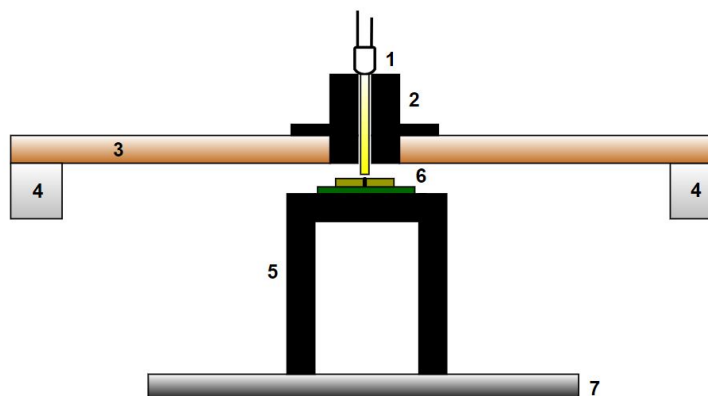
### 3.1 Descripción del sistema

Antes de pasar a describir cada una de las partes del sistema, será necesario proporcionar una visión global del mismo para comprender la función de cada uno de los elementos.

El objetivo en potencia del sistema será permitir la calibración del sensor solar, y, para ello, será necesario modificar la incidencia luminosa que este recibe. Con este fin, el sensor se instalará bajo la plataforma controlada por el posicionador XY con la ayuda de una estructura que permita alojar al sensor de forma fija y paralela al plano del posicionador.

Por otro lado, se diseñará una estructura de acople al posicionador que evitará la incidencia de luz externa y que integrará un conducto a través del cual la luz de la fuente elegida excitará al sensor.

De esta forma, la cubierta se moverá en consonancia con el posicionador, y, con esta, la fuente de luz, de manera que se conseguirá una excitación precisa de cada uno de los fotodiodos del sensor.



**Figura 3.1** Esquema del corte simplificado del sistema: 1- Fuente de luz; 2-Conducto; 3-Cubierta del posicionador; 4-Posicionador XY; 5-Base del sensor; 6- Sensor solar; 7-Base atornillada .

## 3.2 Fuente de luz

El primer elemento a definir será la fuente de luz utilizada.

El sensor solar debe ser excitado con una luz que cumpla ciertas características, entre las que pueden destacar: alta intensidad luminosa, ángulo de apertura reducido y luz de color blanco.

Se ha decidido utilizar un diodo LED como fuente de iluminación debido a que es un dispositivo cuyas propiedades son ampliamente conocidas, apenas requiere de electrónica auxiliar para ser utilizado y se puede adquirir fácilmente en cualquier distribuidor de componentes electrónicos.

Lo primero que se intentó asegurar fue el reducido ángulo de apertura, ya que esta propiedad es intrínseca del dispositivo y de la lente que tenga asociada, y no puede ser modificada de forma externa, a diferencia de la intensidad luminosa que, en algunos casos, puede ser aumentada ligeramente suministrando una mayor corriente eléctrica.

El ángulo de apertura (*viewing angle*) de un LED se considera como el ángulo a partir del cual la intensidad de la luz emitida se ve reducida en un 50%. Por tanto, un reducido ángulo de apertura unido a una alta luminosidad base del LED son la clave para una excitación concentrada e intensa.

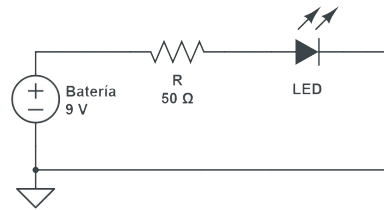
Tras una revisión exhaustiva de los LEDs disponibles en los principales distribuidores de componentes electrónicos, se ha decidido utilizar el LED **C503D-WAN-CCbEb151** del fabricante Cree LED, cuyas características principales, obtenidas de su *datasheet* [10], son:

- *Viewing angle*: 15°
- Intensidad luminosa: Min: 28200 mcd Máx: 64600 mcd Typical: 40000mcd a 20 mA
- Color: Blanco frío (9000K)



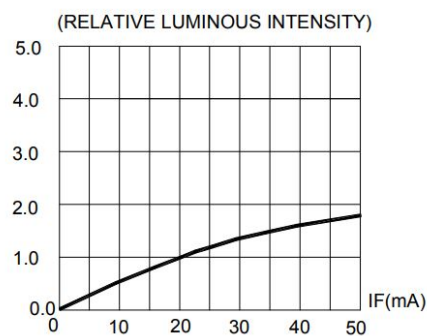
**Figura 3.2** LED C503D-WAN-CCbEb151.

Para poder polarizar el diodo LED, se utilizará una batería de 9V y 600mAh junto a una resistencia de 50Ω que permitirá establecer una corriente eléctrica de unos 80mA aproximadamente.



**Figura 3.3** Esquema eléctrico de la fuente de luz.

Atendiendo a la figura 3.4, obtenida directamente del *datasheet* del dispositivo, se concluye que la intensidad luminosa relativa conseguida con dicha corriente eléctrica será aproximadamente 2, un valor más que suficiente para excitar el sensor.



**Figura 3.4** Intensidad luminosa relativa frente a corriente [10].

A pesar de que la intensidad luminosa conseguida sea suficiente, lo ideal sería que este fuese estimulado con una luz con un ángulo de apertura mucho menor. Además, el área iluminada en los fotodiodos debe tener unas dimensiones máximas. Es por eso que será necesario diseñar un conducto a través del cual la luz viaje y se acondicione a unas características más favorables.

### 3.3 Conducto de luz

Existen dos parámetros a definir en el diseño del conducto de luz: la sección y la longitud.

Atendiendo primeramente a la sección, esta será, además de la distancia a la que se sitúe el sensor, la que definirá la superficie total iluminada sobre los fotodiodos.

Junto al sensor solar (que se presentará en el Capítulo 4) se dispone de una tapa que, una vez acoplada al sensor, sirve de ventana para la luz, asegurando una correcta excitación del mismo. A pesar de que en este trabajo la ventana no se usará con ese fin, serán las dimensiones de la misma las que definan la sección que debe tener el conducto.



**Figura 3.5** Ventana de acople al sensor.

Atendiendo ahora a la longitud del conducto, este parámetro influye en el ángulo de apertura de la luz incidente en el sensor y en la intensidad luminosa de la misma. Por tanto, la decisión de diseño ahora no

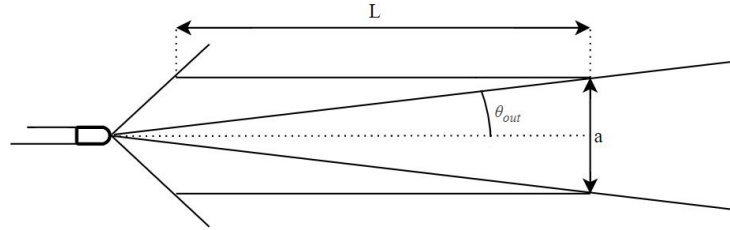
es trivial, y será necesario estudiar cómo se ven afectadas las características de la luz mencionadas con la longitud del conducto.

### 3.3.1 Análisis teóricos

Se van a estudiar, por separado, cómo se ven afectados el ángulo de apertura y la iluminancia en función de la longitud del conducto, así como la superficie iluminada en función de la distancia del sensor al conducto.

#### Ángulo de apertura de salida

El ángulo de apertura de salida  $\alpha_{out}$  se define como el ángulo que se forma entre el punto de emisión de la luz del LED y las dos aristas de la sección del conducto.



**Figura 3.6** Análisis ángulo de apertura de salida.

Atendiendo a la figura 3.6, es trivial afirmar que:

$$\theta_{out} = \tan^{-1}\left(\frac{a}{L}\right) \quad (3.1)$$

Por tanto, el ángulo de apertura de salida,  $\alpha_{out} = 2\theta_{out}$ , depende únicamente de las dimensiones  $a$  y  $L$ .

El parámetro  $a$  viene fijado por la decisión tomada al inicio de este apartado. Tal y como se ha mencionado, la sección del conducto deberá tener las dimensiones de la tapa de la figura 3.5, por lo que el parámetro  $a$  vendrá dado por las dimensiones de la ventana de dicha tapa.

Queda ahora reducida la variación del ángulo  $\theta_{out}$  a la modificación de la longitud del conducto  $L$ .

Para conocer cómo influye el valor de  $\frac{a}{L}$  en el ángulo  $\theta_{out}$  se va a atender primero a la monotonía de la función  $f(x) = \tan^{-1}(x)$ .

La monotonía de la función arcotangente es conocida y creciente, observándose dicho comportamiento en la figura 3.7. Esto significa que mayores valores de  $x$  implican mayores valores de  $f(x)$  y viceversa. Entonces, se puede afirmar que el ángulo  $\theta_{out}$  disminuye cuanto menor sea la expresión  $\frac{a}{L}$ , y de esta forma, cuanto mayor sea  $L$ , longitud del conducto.

Otra forma de comprobar esta última afirmación es, a partir de la expresión 3.1, obtener la variación de  $\theta_{out}$  con  $L$ :

$$\frac{d\theta_{out}}{dL} = -\frac{\frac{a}{2}}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + L^2} \quad (3.2)$$

Sabiendo que  $a$  y  $L$  simbolizan magnitudes físicas que siempre son positivas, se tiene que la expresión 3.2 es negativa en todo caso, luego,  $\theta_{out}$  disminuirá siempre con el aumento del valor de  $L$ . Además, esta expresión nos permite conocer que la variación de  $\theta_{out}$  con  $L$  disminuye con el cuadrado de  $L$ , dando esto una idea de que la disminución de  $\theta_{out}$  para valores de  $L$  elevados no podrá justificar los efectos adversos que esto supondría en la iluminancia recibida por el sensor, aspecto tratado en la parte final de esta sección.

Todas las afirmaciones realizadas para  $\theta_{out}$  se dan para  $\alpha_{out}$ , ya que  $\alpha_{out} = 2\theta_{out}$ .

Por otro lado, de forma teórica se tiene que  $\alpha_{out} \in [0, \alpha_{LED}]$ , siendo  $\alpha_{LED}$  el ángulo de apertura del LED elegido en la sección 3.2.

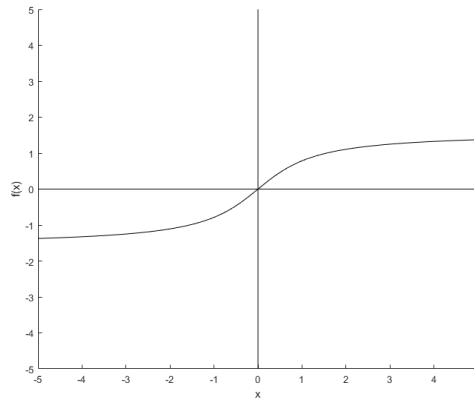


Figura 3.7  $f(x) = \tan^{-1}(x)$ .

**Efecto de la distancia al sensor en la proyección de la luz**

Un aspecto que, aún no siendo inherente al diseño del conducto es importante para garantizar la correcta excitación del sensor, es la distancia a la que este debe estar de la fuente de luz.

En primer lugar, se van a fijar dos distancias  $d1$  y  $d2$ , con  $d2 > d1$ , a las que se podría situar el sensor con el objetivo de analizar cómo varía la superficie iluminada (siendo la ideal un cuadrado de lado  $a$ ) con la distancia.

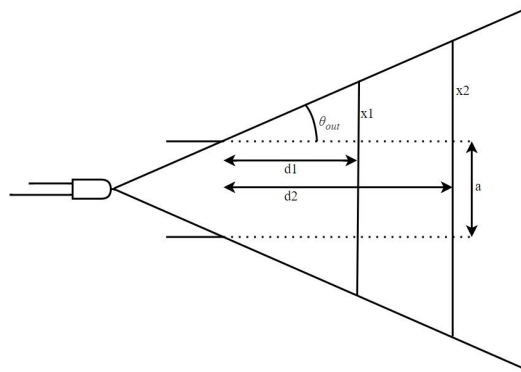


Figura 3.8 Análisis de la distancia del sensor a la fuente de luz.

Atendiendo a la figura 3.8, se tiene:

$$\theta_{out} = \tan^{-1}\left(\frac{x1}{d1}\right) \tag{3.3}$$

$$\theta_{out} = \tan^{-1}\left(\frac{x2}{d2}\right) \tag{3.4}$$

De esta forma:

$$\frac{x1}{d1} = \frac{x2}{d2} \tag{3.5}$$

$$x2 = \frac{d2}{d1} \cdot x1 \tag{3.6}$$

Entonces, siendo  $d_2 > d_1$  se tiene que  $\frac{d_2}{d_1} > 1$  y, por tanto:

$$x_2 > x_1 \quad (3.7)$$

Esto último implica que para un aumento de la distancia a la que se sitúa el sensor, se tiene también un aumento de la superficie iluminada en el mismo, aspecto totalmente indeseable para el sistema de excitación.

Cabe destacar que la expresión 3.5 ha sido obtenida **sin considerar** que para un ángulo cualquiera  $\alpha$  se cumple que  $\tan(\alpha) = \tan(\alpha + \pi)$ , puesto que no tiene sentido físico que el ángulo  $\tan^{-1}(\frac{x_1}{d_1})$  sea  $\tan^{-1}(\frac{x_2}{d_2}) + \pi$ .

#### **Influencia del dimensionado en la iluminancia**

Tal y como se mencionó en la sección 3.2, es necesario que el sensor sea excitado con suficiente intensidad luminosa.

Para estudiar cómo influye el diseño del conducto en este requisito, se especificarán, en primer lugar, las magnitudes físicas de intensidad luminosa, iluminancia y luminancia.

La intensidad luminosa se define como el flujo luminoso de una fuente pasando a través de un ángulo sólido [16] y viene dada por la expresión:

$$I = \frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Ángulo sólido}} \quad (3.8)$$

Pudiendo expresar el ángulo sólido en función del ángulo de apertura de la fuente luminosa,  $\alpha_{out}$ , según la expresión:

$$\text{Ángulo sólido} = 2\pi(1 - \cos(\frac{\alpha_{out}}{2})) \quad (3.9)$$

La iluminancia y la luminancia son magnitudes que dependen directamente de la intensidad luminosa. Por un lado, la iluminancia (E) se define como la cantidad de flujo luminoso que recibe una superficie [16] y viene dada por la expresión:

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (3.10)$$

Con D la distancia a la que se encuentra la superficie de la fuente luminosa.

Por otro lado, la luminancia (L) se define como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie sobre la que está incidiendo [16] y viene dada por la expresión:

$$L = \frac{I}{A} \quad (3.11)$$

A partir de la definición de estas magnitudes se puede concluir lo siguiente:

- La intensidad luminosa (I) aumenta con la reducción del ángulo de apertura.
- La iluminancia (E) se reduce con el aumento de la distancia a la que se encuentra la superficie iluminada.
- La luminancia (L) se reduce con el aumento de la superficie iluminada.

#### **3.3.2 Justificación**

Una vez realizados los análisis teóricos en cuanto a los posibles parámetros de diseño, se puede pasar ahora a justificar las decisiones de diseño y la intencionalidad de las mismas.

Por un lado, la distancia a la que se encuentre el sensor se pretenderá que sea la mínima posible, de tal forma que la superficie iluminada sea lo más parecida a la sección del conducto, es decir, a la superficie ideal de iluminación. De esta manera, se conseguiría que la superficie iluminada tuviese el valor mínimo en el sistema, con el objetivo de que la luminancia (3.11) no se vea reducida, así como que no se incremente la distancia de la fuente luminosa más allá de la de la propia longitud del conducto.

Por otro lado, el parámetro más crítico del diseño será la longitud del conducto. Este parámetro influye positivamente en la reducción del ángulo de apertura, y, por tanto, en el aumento de la intensidad luminosa.

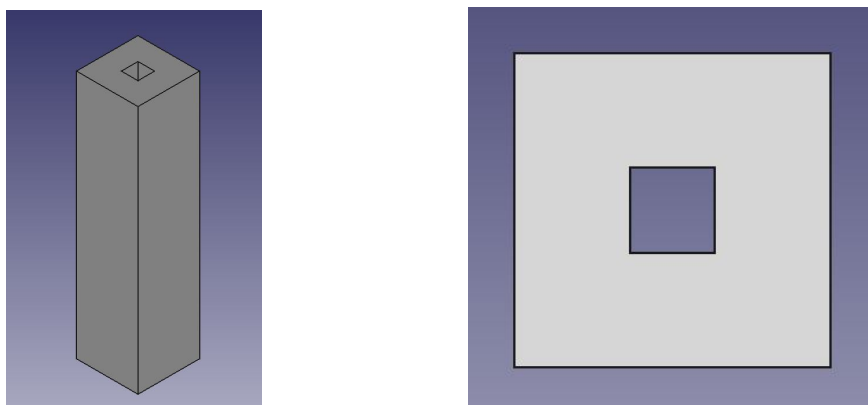


Sin embargo, un aumento de la longitud del conducto implica un aumento de la distancia a la que se sitúa el sensor de la fuente, influyendo negativamente en la iluminancia (3.10).

De esta forma, con la elección de la longitud del conducto, se fijará un compromiso entre el ángulo de apertura logrado, la intensidad luminosa y la iluminancia conseguida, a fin de que ninguna de estas magnitudes se vea afectada en mayor grado que el resto y exista un equilibrio coherente en el resultado.

### 3.3.3 Diseño final

Para su correcto dimensionado y con la intención de tener una idea de cómo se vería el conducto previamente a su fabricación, se ha realizado un modelo en 3D, utilizando el software *FreeCAD*, del mismo.



**Figura 3.10** Vista isométrica y planta del modelo en 3D del conducto.

Las dimensiones del conducto ideal son de 7.4x7.4x300 mm, con una apertura cuadrada de 2 mm de lado, que coincide con el lado de la ventana de la tapa de acople del sensor (figura 3.5).

Debido a la precisión requerida, especialmente en el diseño del conducto de 2 mm de lado, la solución más inmediata y accesible será utilizar una impresora 3D que permita construir el modelo diseñado con suficiente precisión.

La impresora utilizada, proporcionada por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, será la Creality Ender 3, una impresora que, aún siendo básica, es de las más utilizadas y vendidas en el mercado, consiguiendo unos resultados muy precisos en la impresión.



**Figura 3.11** Creality Ender 3 [3].

Las características principales de esta impresora son [8]:

- Volumen de impresión: 220x220x250 mm.
- Precisión de impresión:  $\pm 0.1$  mm.
- Materiales de impresión: PLA, ABS, TPU, etc.
- Diámetro boquilla: 0.4 mm.
- Espesor de capa: 0.1-0.35 mm.

La alta precisión y el bajo coste de los materiales utilizados para la impresión hacen de esta impresora una perfecta opción para el diseño del conducto.

El resultado de la impresión del modelo presentado en la figura 3.10, se presenta a continuación. Se ha decidido imprimir dos conductos con longitudes diferentes para observar las diferencias entre ellos y utilizar el que mejor excitación del sensor consiga.



**Figura 3.12** Conductos de luz impresos en 3D.

## 3.4 Cubierta del posicionador

Se diseñará una cubierta atornillada al posicionador, presentado en la sección 3.6, a la que se le adherirá el conducto diseñado en la sección 3.3 con el objetivo de poder controlar con elevada precisión el punto de aplicación de la luz.

### 3.4.1 Justificación

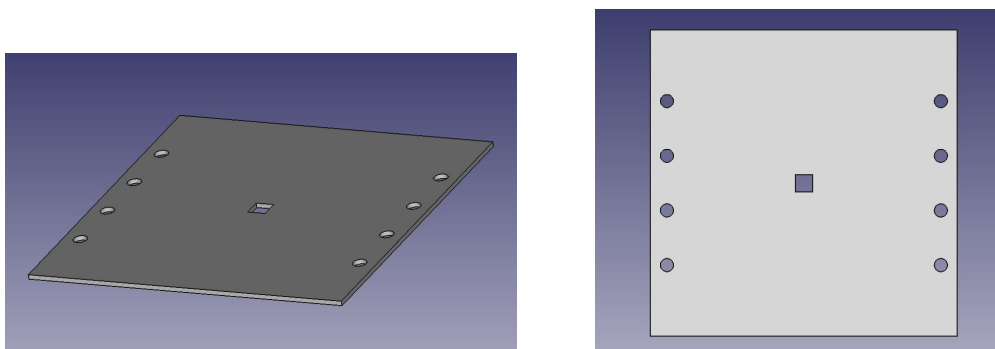
El ambiente en el que se sitúe el sensor es crucial para la fiabilidad de la medida que proporciona. Es por eso que se necesita una cubierta que evite que el sensor pueda verse excitado por luz que no provenga únicamente de la del LED utilizado.

Debido a que el sensor se encontrará en el interior del posicionador, es indispensable que el material con el que se diseñe la cubierta sea completamente opaco.

Como la fuente de luz será solidaria al movimiento de la cubierta al estar adherida a ella, es importante que esta lo sea al movimiento del posicionador. Para ello, se atornillará la cubierta a este último con tornillos de los que se dispone para acoplar elementos tanto al posicionador como a la base antivibraciones.

### 3.4.2 Diseño final

De nuevo, para su correcto dimensionado y con la intención de tener una idea de cómo se vería la cubierta previamente a su fabricación, se ha realizado un modelo en 3D, utilizando el software *FreeCAD*, de la misma.



**Figura 3.14** Vista isométrica y planta del modelo en 3D de la cubierta.

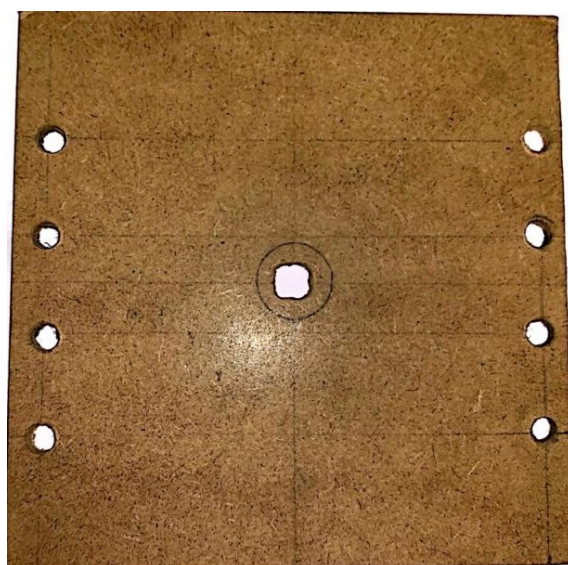
Las dimensiones de la cubierta ideal son de 140x140x2 mm con unas perforaciones de radio 3.5 mm como pasantes de los tornillos y una apertura cuadrada en su centro de 7.4 mm como pasante del conducto de luz.

La fabricación real, sin embargo, se aleja ligeramente de estas medidas ideales, debido a las imprecisiones y tolerancias de los métodos utilizados y a la disponibilidad de materiales.

Finalmente, se ha decidido diseñar la cubierta utilizando madera DMF, ideal por su manejabilidad, bajo coste y facilidad para realizar perforaciones y modificaciones que permitan introducir tornillos y adherir el conducto. Además, cumple correctamente con el requisito de ser un material opaco.

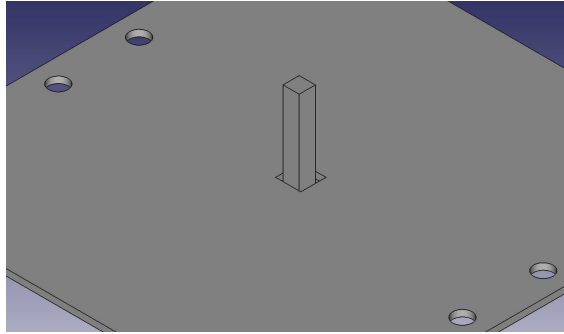
Las dimensiones de la plancha de madera utilizadas son de aproximadamente 140x140x3mm, bastante similares a las ideales. Las perforaciones circulares se han realizado utilizando un taladro fijo disponible en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, obteniendo un radio de las mismas de, aproximadamente, 4mm en cada una de ellas.

La apertura cuadrada del centro de la cubierta ha sido realizada con el mismo taladro que las perforaciones circulares, originando por tanto, un resultado aproximado en la forma cuadrada de la misma.



**Figura 3.15** Cubierta en madera DMF.

Sin embargo, esto puede producir problemas a la hora de introducir el conducto a través de la apertura, pues al ser esta aproximada, podría existir luz externa que atravesase la misma, incidiendo en el sensor. Este aspecto es totalmente indeseable pues es un requisito indispensable que la única fuente de excitación sea la luz del LED.



**Figura 3.16** Situación desfavorable.

Para solucionar este problema, se modificará la tapa de acople del sensor (figura 3.5) y se colocará sobre la apertura cuadrada, dejando pasar al conducto y evitando que otra fuente luminosa incida en el sensor.



**Figura 3.17** Tapa modificada.

La forma en la que el conducto, la tapa y la cubierta se acoplan se presentará en la sección 3.7.

## 3.5 Base del sensor

Se diseñará una estructura que aloje al sensor y lo fije a la base antivibraciones donde se encuentra atornillado el posicionador.

### 3.5.1 Justificación

La estaticidad del sensor es clave para el sistema de calibración que se va a diseñar. La particularidad que tiene el diseño desarrollado en este trabajo reside en que es la fuente de luz la que se mueve, en lugar de el sensor respecto a la fuente de luz. Ambas técnicas implican una modificación del ángulo de incidencia de la luz, sin embargo, es el elemento fijo el que varía entre ellas.

Con el objetivo de que el sensor esté inmóvil durante todo el proceso de calibrado, la estructura diseñada deberá permitir el uso de tornillos que mantengan el conjunto unido a la base del posicionador.

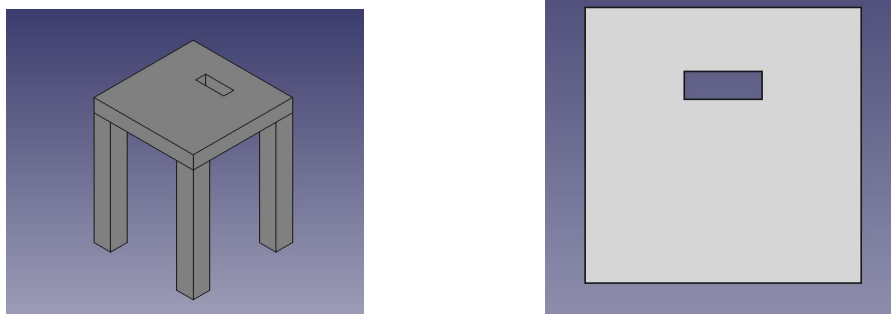
Además de estar fijo, es fundamental que el plano que forma el fotodiodo de cuatro cuadrantes del sensor sea paralelo a la luz que proviene del conducto, y, por tanto, a la cubierta del posicionador. Se puede deducir entonces que la precisión en el método de fabricación utilizado para esta estructura es crítica.

### 3.5.2 Diseño final

De la misma manera que para el conducto y la cubierta del posicionador, se ha utilizado el modelado 3D para tener una visión global de cómo se vería la base previamente a su fabricación, además de asegurar su correcto dimensionado.

En este caso, dos estructuras han sido diseñadas para cumplir la función de base del sensor que serán acopladas entre sí de forma mecánica y, si fuera necesario, con ayuda de adhesivo.

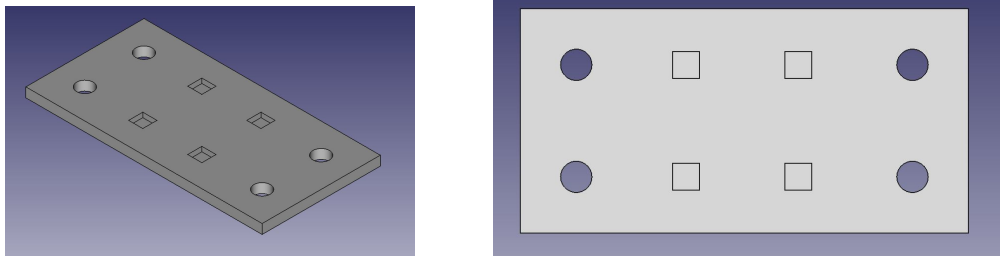
La primera de ellas permitirá el acople y la inmovilización del sensor, asegurando además la condición de paralelismo a la fuente de luz.



**Figura 3.19** Vista isométrica y planta del modelo en 3D de la primera estructura de la base.

La ranura existente en esta estructura servirá para introducir el conector del sensor utilizado, que será presentado en la sección 4.1.

La segunda estructura permite el acople de esta primera y el atornillado a la base antivibraciones donde está situado el posicionador, garantizando por tanto la estabilidad y estaticidad del conjunto.



**Figura 3.21** Vista isométrica y planta del modelo en 3D de la segunda estructura de la base.

Por la complejidad de las estructuras, utilizar técnicas como las empleadas para la cubierta no tendrían resultados demasiado precisos, por lo que se ha optado, de nuevo, por fabricar la estructura mediante técnicas de impresión 3D, usando la misma impresora con la que se fabricó el conducto.

El resultado de la impresión de los modelos presentados en las figuras 3.19 y 3.21, se expone a continuación:

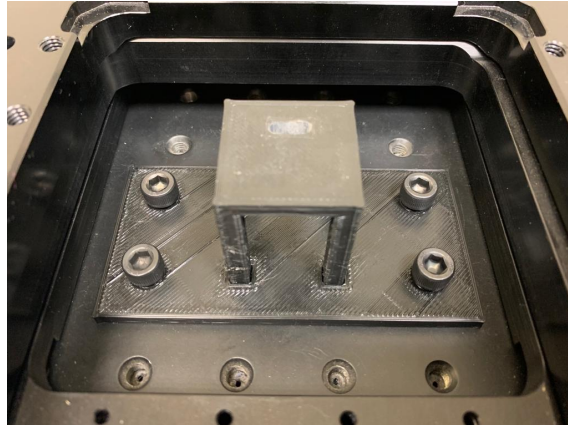


**Figura 3.22** Primera estructura impresa en 3D.



**Figura 3.23** Segunda estructura impresa en 3D.

Una vez impresas ambas estructuras, es necesario comprobar que el acople se produce correctamente, que es posible atornillar el conjunto a la base antivibraciones y que el sensor permanece inmóvil.



**Figura 3.24** Base del sensor completa.

Se puede apreciar en la figura 3.24 que ambas estructuras se acoplan a la perfección y que los tornillos pueden ser utilizados para asegurar la estabilidad del conjunto. Fue necesario, sin embargo, adherir ligeramente ambas estructuras con pegamento de contacto para garantizar completamente el acople mecánico.

La forma en la que el sensor se acopla a la estructura será presentada en la sección 3.7, junto al resto de elementos diseñados.

### 3.6 Posicionador XY

Los diseños de las estructuras desarrolladas anteriormente cobran sentido una vez se especifique cuál va a ser la herramienta de control de la incidencia de luz en el sensor.

La función principal que debe cumplir el sistema de calibración es tener la posibilidad de controlar de forma muy precisa la incidencia de la luz. Debido a las dimensiones del fotodiodo, la sensibilidad del sensor y la alta precisión que se necesita para poder excitar al sensor correctamente, será necesario disponer de una herramienta de altas prestaciones para cumplir correctamente con esta tarea. Es por eso que el uso de un microposicionador de alta precisión es una perfecta solución a este problema. Concretamente, se utilizará el posicionador 8MTF del fabricante Standa.



**Figura 3.25** Posicionador 8MTF de Standa [19].

El fabricante asegura, entre otras, las siguientes especificaciones para su dispositivo:

- Resolución:
  - Modo *Full Step*:  $2.5\mu\text{m}$ .
  - Modo *1/8 step*:  $0.31\mu\text{m}$ .
- Velocidad máxima: 10 mm/s.
- Capacidad de carga.
  - Horizontal: 50 kg.
  - Vertical: 6 kg.
- Límites mecánicos.
- Alta precisión y repetibilidad.
- Rango de desplazamiento: 102x102 mm.

Para poder realizar movimientos de alta precisión en el plano, el posicionador está provisto de dos motores de muy altas prestaciones que controlarán los dos ejes de forma independiente.

Será necesario, sin embargo, utilizar un *hardware* adicional que permita el control del dispositivo. En este trabajo se utilizará el controlador **8SMC4-USB-B9-2** de Standa, mismo fabricante que el del posicionador.



**Figura 3.26** Controlador 8SMC4-USB-B9-2 [20].

En cuanto al control de los motores, este modelo permite [1]:

- Modificar el modo de paso de los motores: paso completo, 1/2 paso, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128 y 1/256 de paso.
- Una velocidad mínima de 1/256 pasos/s y una velocidad máxima de 35000 pasos/s.
- Un desplazamiento mínimo en ambos ejes de 1/256 pasos y uno máximo de 2147483647 pasos.
- Arranque y frenado suaves.
- Distintos modos de movimiento: movimiento en ambos ejes, desplazamiento a un punto, velocidad continua, rampas de aceleración y frenado, etc.
- Modo automático de calibrado (HOME).
- Establecer límites de posición en ambos ejes.

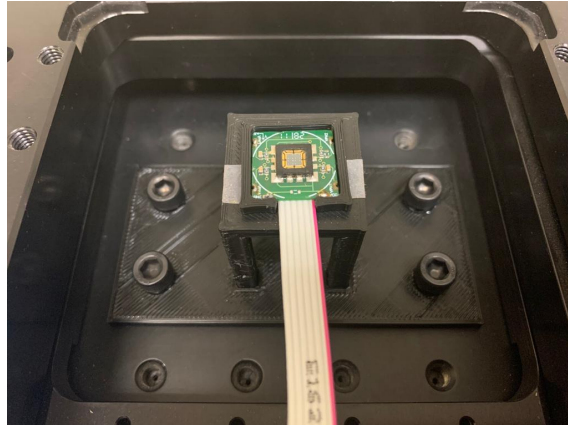
Con este dispositivo, además de un posible control manual de ambos ejes a partir de unos pulsadores integrados en el mismo (figura 3.26), la comunicación con el posicionador se reduce a una simple comunicación USB, quedando por tanto por definir los distintos métodos de programación que existen para el diseño de algoritmos de control, aspecto que se tratará en el Capítulo 5.



### 3.7 Estructura total

Con el objetivo de proporcionar una visión general de este capítulo y entender así la relación entre las estructuras y las necesidades de cada una de ellas, se van a presentar rápidamente los resultados obtenidos y las ligeras modificaciones que hayan sido necesarias realizar.

En primer lugar, se muestra en la siguiente figura el resultado de posicionar el sensor en la base diseñada para el mismo, con el objetivo de comprobar que este se mantiene fijo y paralelo al plano del posicionador.



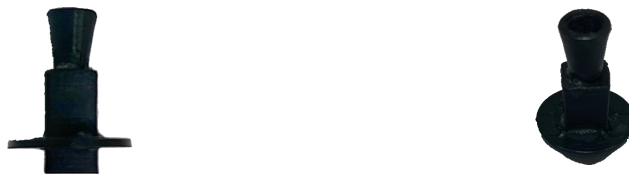
**Figura 3.27** Sensor alojado en la base.

De forma adicional, tal y como se observa en la figura 3.27, se diseñó una pequeña estructura que sirve de soporte al sensor con el objetivo de asegurar aún más la estabilidad del mismo.



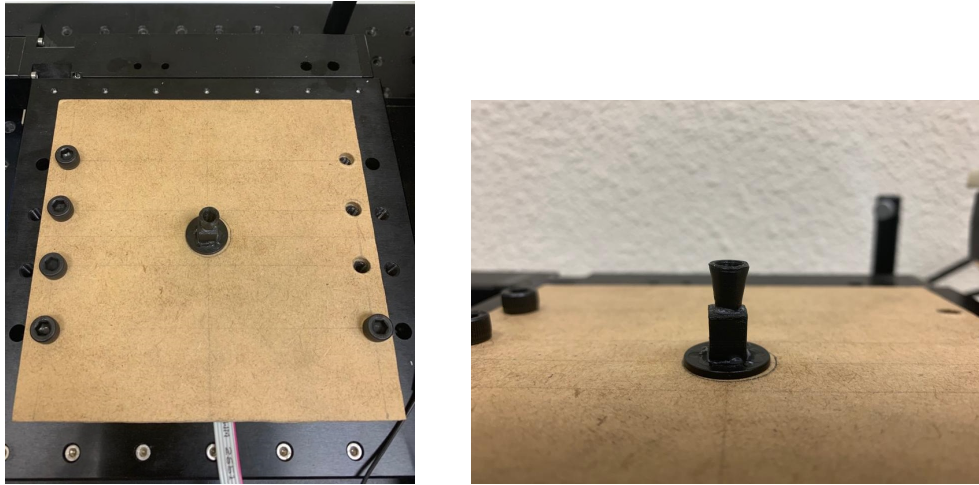
**Figura 3.28** Estructura adicional.

En segundo lugar, se va a presentar el resultado de combinar el conducto de luz con la ventana modificada y una estructura auxiliar que sirve de acople para el LED.



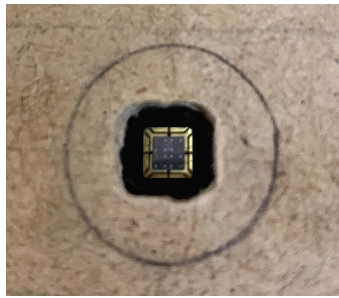
**Figura 3.30** Estructura final del conducto de luz.

En tercer lugar, se va a mostrar el resultado del acople de la estructura del conducto de luz con la cubierta del posicionador.



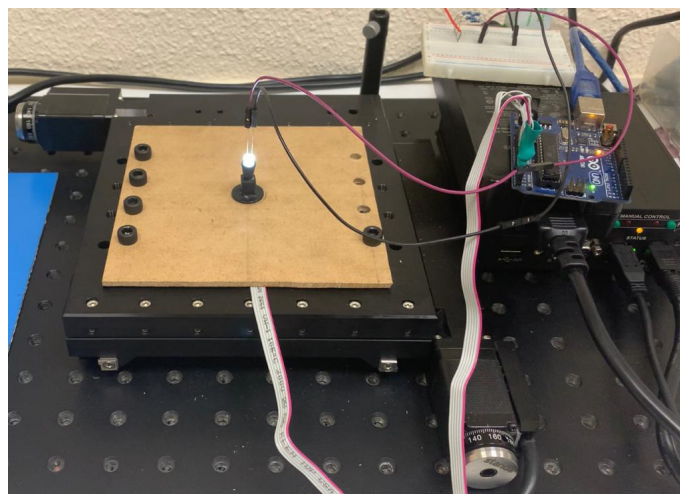
**Figura 3.32** Estructura final del conducto de luz.

Para que se pueda estimar la distancia a la que se encuentra el sensor del conducto de luz, se muestra en la siguiente figura los fotodiodos del sensor a través de la ranura de la cubierta.



**Figura 3.33** Sensor a través de la ranura.

Por último, se presenta a continuación el acople del LED a la estructura, y, con esto, el sistema completo diseñado.



**Figura 3.34** Sistema completo.

## 4 Adquisición de datos

---

En este capítulo se describirá el sensor utilizado, sus características y funcionamiento. Además, se detallará el método de adquisición de datos empleado.

### 4.1 Sensor solar NANO-ISSX

Tras la explicación del funcionamiento de los sensores solares basados en fotodiodos de cuatro cuadrantes (realizada en el Capítulo 1) y un análisis exhaustivo de las estructuras necesarias para poder excitar correctamente al sensor (realizado en el Capítulo 3), se va a pasar ahora a concretar cuál será el sensor que se utilizará en este trabajo.

El sensor solar cuya respuesta eléctrica se pretende obtener en este trabajo es un sensor de *solar tracking* de la empresa Solar MEMS. Concretamente, un sensor de la serie NANO-ISSX que se caracteriza por su reducido tamaño, bajo consumo y diseño compacto.



Figura 4.2 Detalle del sensor NANO-ISSX.

Este sensor permite calcular el vector del rayo incidente a partir de la proyección del mismo en dos ejes ortogonales dentro de su campo de visión (FOV).

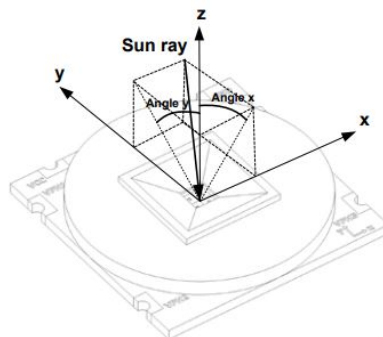
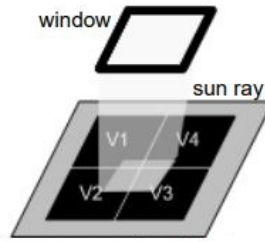


Figura 4.3 Sistema de referencia de ejes del sensor [12].

El funcionamiento del sensor se basa, tal y como se vió en el Capítulo 1, en dejar pasar el rayo de luz a través de una ventana, de forma que los fotodiodos tengan cierta parte de su área iluminada, induciéndose una corriente eléctrica en cada uno de ellos.



**Figura 4.4** Esquema de funcionamiento del sensor [12].

Este sensor proporciona las tensiones de los cuatro fotodiodos a su salida, tensiones que permiten obtener los ángulos de proyección del rayo incidente en los dos ejes establecidos en la figura 4.3.

Atendiendo a su *datasheet* [12], se pueden obtener las expresiones que relacionan la tensión de los fotodiodos con los ángulos del rayo incidente.

En primer lugar, se definen cuatro variables auxiliares a partir de las tensiones de los fotodiodos que permitan simplificar las expresiones finales:

$$X_1 = V_{PH3} + V_{PH4} \quad (4.1)$$

$$X_2 = V_{PH1} + V_{PH2} \quad (4.2)$$

$$Y_1 = V_{PH1} + V_{PH4} \quad (4.3)$$

$$Y_2 = V_{PH2} + V_{PH3} \quad (4.4)$$

Con  $V_{PHi}$  la tensión correspondiente al fotodiodo  $i$ .

Definiendo ahora:

$$F_X = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1} \quad (4.5)$$

$$F_Y = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1} \quad (4.6)$$

Se tiene que los ángulos en el eje X y en el eje Y del rayo incidente son:

$$\text{Angle } X = \tan^{-1}(C \cdot F_X) \quad (4.7)$$

$$\text{Angle } Y = \tan^{-1}(C \cdot F_Y) \quad (4.8)$$

Donde C es un factor de corrección con un valor diferente para cada uno de los modelos de la serie NANO-ISSX.

Type	Value
NANO-ISS60	1,889
NANO-ISS25	0,477
NANO-ISS15	0,273
NANO-ISS5	0,125

**Figura 4.5** Valores del parámetro C para cada modelo.

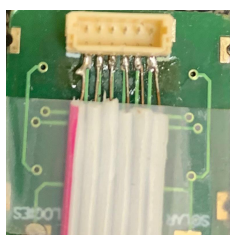
## 4.2 Lectura de tensiones

Una vez definido el funcionamiento del sensor y la forma en la que este calcula el ángulo de incidencia, queda claro que la lectura de tensiones es la clave para la obtención de su respuesta eléctrica.

En primer lugar, antes de considerar la forma en la que se van a obtener las tensiones, hay que definir la manera en la que el sensor será alimentado. Según sus especificaciones técnicas [12], el sensor puede ser alimentado con una tensión entre 3V y 12V. Por otro lado, las tensiones de los fotodiodos, siendo el sensor alimentado a 5V, estarán comprendidas en un rango de 0 a 4.5V.

El sensor está disponible en dos formatos: uno diseñado en SMD (*Surface Mounting Device*), listo para su utilización en PCBs, y otro diseñado para ser conectado por un cable a través de un conector. Es este último tipo de sensor del que se dispone para este trabajo (figura 4.2).

Tras una búsqueda exhaustiva de conectores tipo macho que permitiesen alimentar al sensor directamente por el conector que traía acoplado, se decidió alimentar y leer las tensiones del sensor a partir de unos cables multiplanares que se soldaron al mismo.



**Figura 4.6** Cables multiplanares soldados.

Es momento entonces de decidir cuál será el medio de adquisición de datos a utilizar para obtener la información del sensor.

A partir de las características eléctricas, un microcontrolador parece la mejor opción. Los rangos de tensión tanto de alimentación, como de salida del sensor, son soportados por la mayoría de microcontroladores del mercado, además, integran normalmente un convertidor analógico-digital que permitirá leer las tensiones de cada uno de los fotodiodos y tratarlas digitalmente.

El microcontrolador que se utilizará en este trabajo es uno de los más empleados en proyectos de electrónica debido a su amplia comercialización y bajo coste: el microcontrolador Arduino UNO.

Dentro de sus características técnicas [2], las que resultan más útiles en el proceso de adquisición de datos son:

- Tensión de funcionamiento: 5V.
- Entradas analógicas: 6.
- Convertidor A/D: 6 canales y 10 bits.
- Salida a 3.3V y 5V para alimentar dispositivos.
- USART programable.

La capacidad de alimentar dispositivos externos a 5V y el convertidor analógico-digital con una resolución de 10 bits, hacen de este microcontrolador una muy buena opción tanto para la adquisición de datos como para la alimentación del sensor.



Figura 4.7 Arduino UNO [2].

### 4.3 MATLAB como método de adquisición de datos

MATLAB es una plataforma que permite analizar datos, realizar cálculo numérico, interfaces gráficas, simulaciones complejas, importar herramientas externas y un sin fin de aplicaciones útiles en el ámbito de la ingeniería y la ciencia en general.

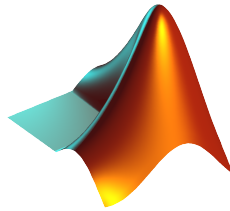


Figura 4.8 Logo de MATLAB.

Una de las ventajas de utilizar este *software* es su lenguaje de alto nivel e interpretado, que permite diseñar algoritmos complejos y códigos altamente eficientes, pudiéndose ejecutar los programas tanto en entornos interactivos como en *scripts*.

Otra de las ventajas de MATLAB, de especial utilidad en este trabajo, es la compatibilidad existente con multitud de dispositivos, entre los que se encuentra Arduino.

**MATLAB Support Package for Arduino Hardware** es un *Add-On* que permite comunicar de forma interactiva MATLAB con Arduino. Dentro de todas las funcionalidades que posibilita este *Add-On*, leer la tensión de las entradas analógicas del microcontrolador permite el tratamiento y la representación de la respuesta eléctrica del sensor, una de las bases del sistema de calibración a diseñar.

#### 4.3.1 Implementación

Una de las razones por las que se ha decidido utilizar esta herramienta es la facilidad de implementación, especialmente en la aplicación de este trabajo.

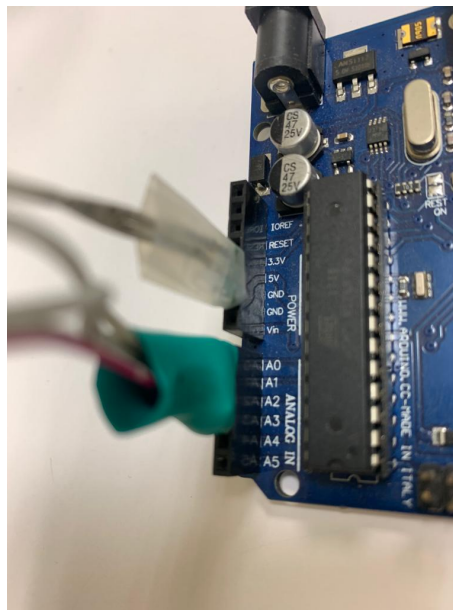
En primer lugar, ha de definirse un objeto que permita identificar la conexión existente con el microcontrolador y que se utilizará cada vez que quiera hacerse referencia al mismo en el código.

En segundo lugar, han de definirse los pines utilizados por el sensor como entradas analógicas. Una vez hecho esto, será posible entonces leer el nivel de tensión existente en dichas entradas, es decir, la respuesta eléctrica del sensor.

**Código 4.1** Lectura de datos de Arduino.

```
a = arduino;
configurePin(a,'A0',AnalogInput);
configurePin(a,'A1',AnalogInput);
configurePin(a,'A2',AnalogInput);
configurePin(a,'A3',AnalogInput);
vph1 = readVoltage(a,'A2');
vph2 = readVoltage(a,'A3');
vph3 = readVoltage(a,'A0');
vph4 = readVoltage(a,'A1');
```

Tal y como se puede intuir del código, los cuatro fotodiodos están conectados a las entradas A2, A3, A0 y A1, respectivamente.



**Figura 4.9** Conexión sensor-arduino.





## 5 Programa principal

---

En este capítulo se presentará el funcionamiento del programa principal diseñado para el sistema de calibración, realizando una descripción de la interfaz gráfica del mismo así como una explicación del método de obtención del cero y el barrido.

### 5.1 Objetivos del programa principal

El programa principal será el *software* que gobierne todos los procesos a controlar en el sistema de calibración.

Existen tres elementos clave que este programa debe implementar: una interfaz gráfica, la representación de la respuesta eléctrica del sensor y el control del posicionador.

Mediante la interfaz gráfica se proporcionará un entorno *user-friendly* con el que entender los distintos procesos que se llevan a cabo en el programa. Además, será la herramienta que permita la integración de toda la información disponible en el sistema y la toma de decisiones en el mismo.

Es crucial que el usuario sea capaz de observar la respuesta eléctrica del sensor y modificar la excitación que este recibe. En concreto, se implementarán 3 modos de control del posicionador que podrán ser elegidos por el usuario en todo momento.

Con este programa se podrá obtener el cero del sensor, realizar un barrido dentro del campo de visión del mismo o incluso modificar de forma manual la luz incidente.

La herramienta utilizada, al igual que para la adquisición de datos, será MATLAB.

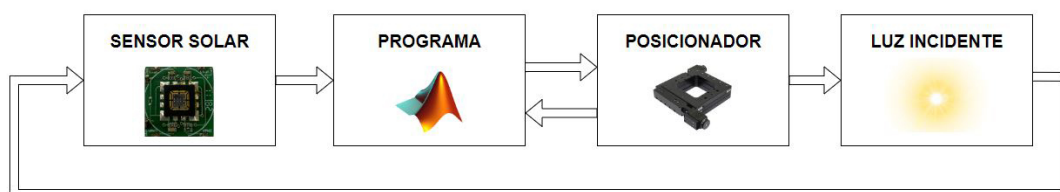


Figura 5.1 Esquema de la función del programa.

## 5.2 Interfaz gráfica

Uno de los principales objetivos de este trabajo es la integración de toda la información disponible. La respuesta eléctrica del sensor y la posición de la luz incidente están íntimamente relacionadas, por lo que ser capaces de observar, analizar y manipular ambas al mismo tiempo es crucial para conseguir entender el comportamiento del sistema de calibración.

La interfaz gráfica será el elemento que permita cumplir este objetivo y la cara visible de todo el programa.

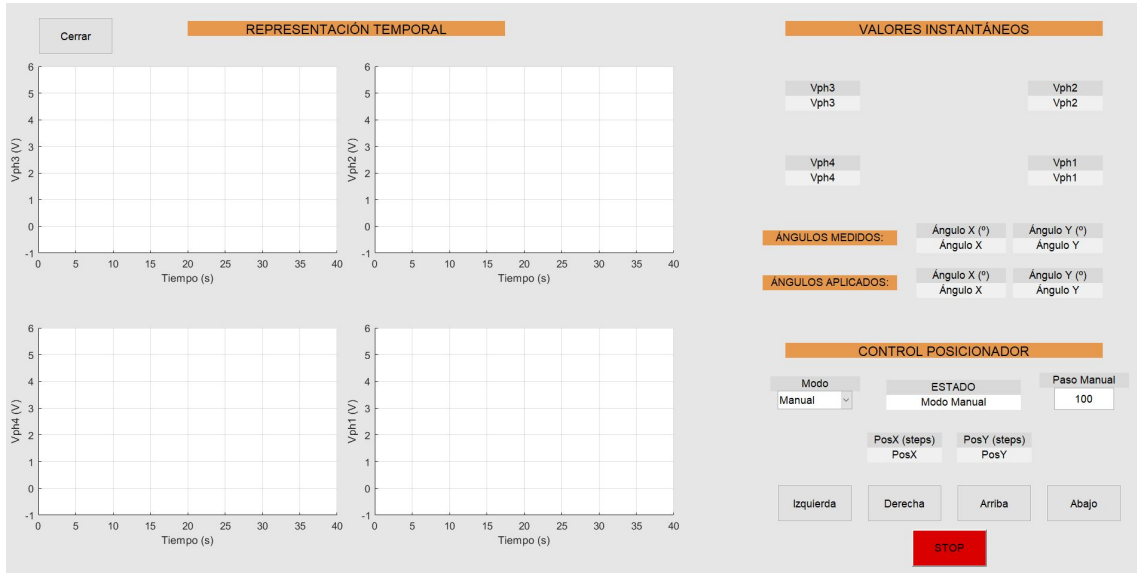


Figura 5.2 Interfaz gráfica del programa principal.

### 5.2.1 Adquisición de datos

La mayor parte de la interfaz tiene como finalidad la representación de los datos obtenidos del sensor.

Por un lado, la tensión obtenida de cada fotodiodo podrá ser observada de dos formas: en la parte izquierda de la interfaz, la variación temporal de las tensiones y, a la derecha, el valor instantáneo de las mismas. Con estas dos maneras, se podrá analizar correctamente la evolución de dichas tensiones y verificar que tienen un valor correcto, por ejemplo, en el caso del punto de  $0^\circ$ .

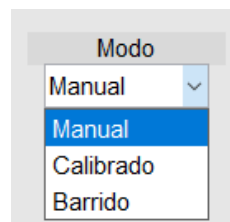
Por otro lado, se podrán ver representados los ángulos en grados que estaría midiendo el sensor a partir de sus tensiones, calculados con las expresiones presentadas en el Capítulo 4.



**Figura 5.3** Ángulos medidos en la interfaz.

### 5.2.2 Control del posicionador

Desde la interfaz será posible la selección del modo en el que se realizará el control del posicionador entre: manual, calibrado y barrido.



**Figura 5.4** Selección de modos de funcionamiento.

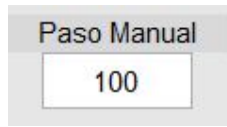
#### Modo manual

En el modo Manual el usuario tendrá el control total del dispositivo. En primer lugar, en la parte inferior de la interfaz se permitirá elegir el eje en el que se realizará el movimiento, así como detener el posicionador en cualquier momento. Para una mayor comprensión, los movimientos se han expresado como Izquierda, Derecha, Arriba y Abajo en la interfaz.



**Figura 5.5** Control manual.

Además, se podrá seleccionar también número de pasos que se realizará en cada movimiento, con un valor inicial por defecto de 100 *steps*.



**Figura 5.6** Número de pasos en el modo manual.

Para evitar que se alcancen los límites establecidos en la posición del posicionador, se ha definido también un límite en el número de pasos en el modo manual. No se podrá realizar un movimiento de más de 5000 pasos.

### Calibrado

En el modo Calibrado el programa pasará ahora a tener el control total del posicionador. Con este modo de funcionamiento se pretende realizar una búsqueda del punto en el que los cuatro fotodiodos estén iluminados por el mismo área, y, por tanto, proporcionando la misma tensión.

El algoritmo utilizado en este modo se detallará en la sección 5.3.

### Barrido

En el modo Barrido el programa tendrá de nuevo el control del posicionador. En este caso, a partir del punto encontrado en el modo anterior, se realizará un barrido que permita obtener las tensiones de los fotodiodos para diferentes ángulos incidentes de la luz.

Estos ángulos de incidencia también serán mostrados en la interfaz durante el proceso de barrido.



**Figura 5.7** Ángulos aplicados en la interfaz.

El algoritmo utilizado en este modo se detallará en la sección 5.4.

### 5.2.3 Información adicional

Por último, para terminar de completar la interfaz gráfica y como *feedback* adicional para cada uno de los modos de funcionamiento, se podrá observar también la posición cada uno de los ejes del posicionador (en *steps*), así como se mostrarán mensajes acerca del estado del programa.



**Figura 5.11** Estados del programa.

Habrán un mensaje para cada uno de los modos de funcionamiento. En el caso del barrido, si se intenta realizar antes de encontrar el cero del sensor, se informará de que debe realizarse primero el calibrado.

### 5.3 Método de búsqueda del cero

En esta sección se va a describir cuál es el algoritmo que se ha diseñado para conseguir detectar el punto en el que el sensor proporciona tensiones iguales para los cuatro fotodiodos, punto en el que todos ellos tendrán un área idéntica iluminada, conocido como punto del "cero" del sensor.

En la siguiente figura, a modo de presentar el método diseñado, se representará el diagrama de flujo del algoritmo total, cuyos pasos serán descritos a continuación.

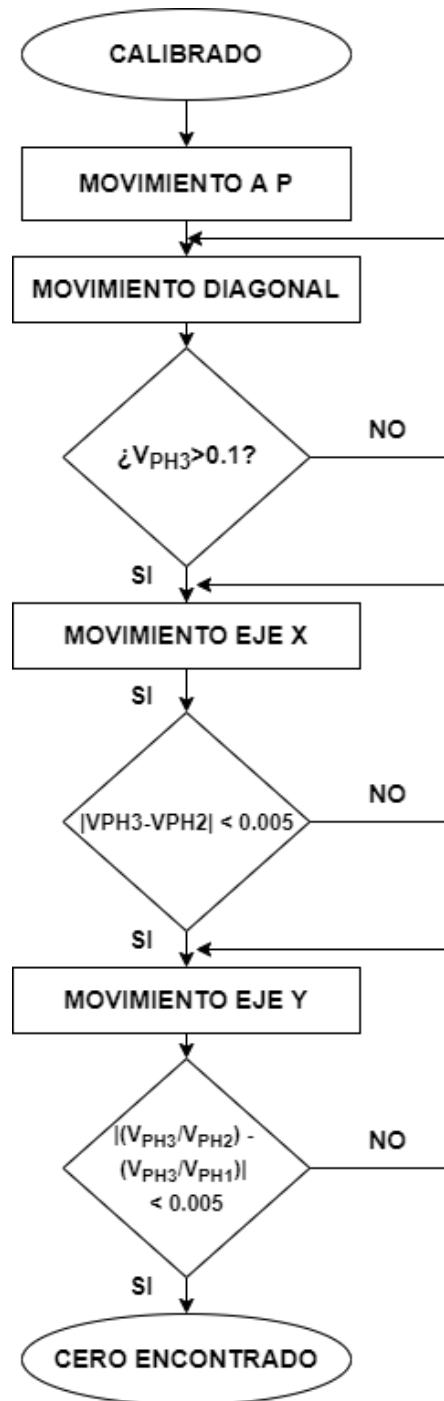


Figura 5.12 Diagrama de flujo del algoritmo de calibrado.

### 5.3.1 Paso 1. Movimiento al punto P

En el primer paso, partiendo de un punto cualquiera, dentro de los límites establecidos para el movimiento del posicionador, se realizará un movimiento a un punto P conocido. Este punto permitirá partir siempre desde la misma posición en el proceso de calibración, fue obtenido manualmente y asegura el correcto funcionamiento del paso 2.

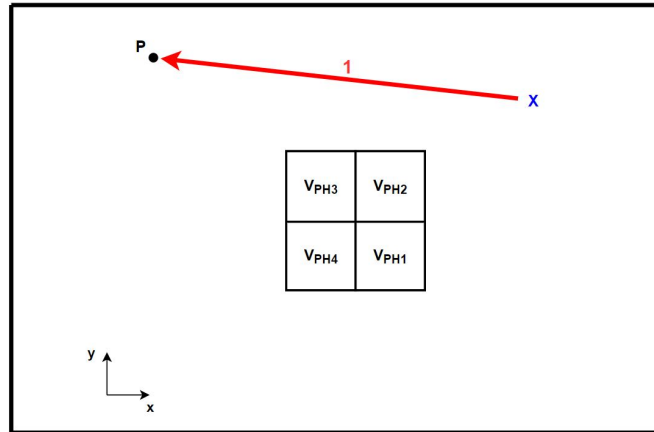


Figura 5.13 Paso 1 del algoritmo de calibración.

Se ha representado con una cruz azul el punto inicial arbitrario desde el que parte el algoritmo. Además, en la parte central, la orientación del sensor, y, por tanto de los posicionadores, es la que tendría el sensor si el usuario observa al sistema de forma frontal (desde el mismo punto que se tomó la fotografía de la figura 3.34).

La velocidad en este paso será de 300 *steps/s*.

### 5.3.2 Paso 2. Movimiento diagonal

En el segundo paso, se realizará un movimiento en diagonal desde el punto P, con el objetivo de aproximar la luz al sensor. En este caso, se buscará la excitación del fotodiodo 3 hasta que este supere un umbral de tensión de 100 mV, considerado suficiente para comenzar a buscar el cero en el eje X (paso 3).

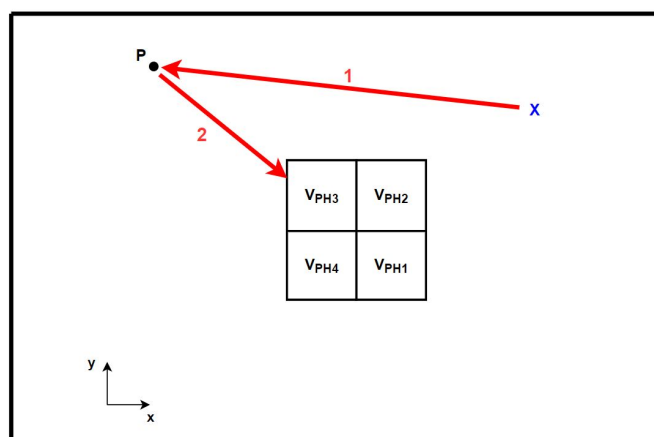


Figura 5.14 Paso 2 del algoritmo de calibración.

La velocidad en este paso será la misma que en el paso 1, pero los movimientos se harán de 20 en 20 *steps* tras cada comprobación de la tensión del fotodiodo 3.

### 5.3.3 Paso 3. Movimiento en el eje X

En el paso 3, una vez alcanzado un nivel correcto de tensión en el fotodiodo 3, se realizará un movimiento en el eje X con el objetivo de encontrar el punto en el que los fotodiodos 2 y 3 tengan una diferencia de tensión mínima. En este punto se habría encontrado el valor de la coordenada X del punto del cero del sensor.

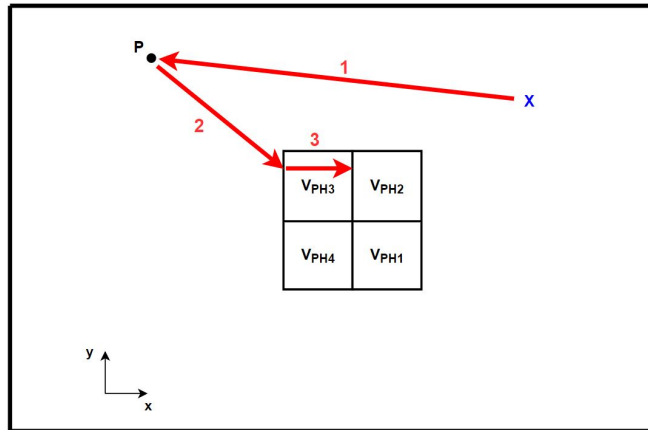


Figura 5.15 Paso 3 del algoritmo de calibración.

En este paso, la velocidad será de 50 *steps/s* aunque los movimientos se harán con desplazamientos de 1 *step*, comprobando la diferencia de tensión entre los fotodiodos 2 y 3.

### 5.3.4 Paso 4. Movimiento en el eje Y

Haber encontrado, en el paso 3, el punto en el que los fotodiodos 2 y 3 proporcionan la misma tensión, implica que la búsqueda del cero del sensor se reduce ahora a modificar la coordenada Y del posicionador hasta que la diferencia en el área iluminada y en la tensión de los cuatro fotodiodos sea la mínima, habiendo encontrado entonces el cero del sensor.

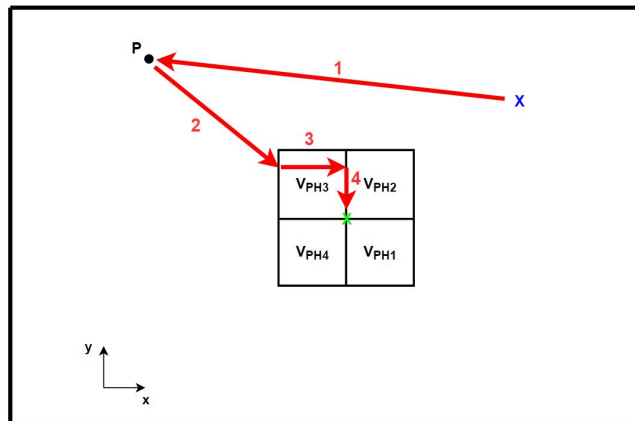


Figura 5.16 Paso 4 del algoritmo de calibración.

En este paso, la velocidad será idéntica a la del paso 3 y el movimiento también se realizará con desplazamientos de 1 *step*. Esto se hace para mantener una alta precisión en el proceso de búsqueda y evitar el momento en el que la tensión de los fotodiodos 1 y 4 supere a la de los fotodiodos 2 y 3, momento en el que la condición de detención jamás se alcanzaría.

## 5.4 Barrido

En esta sección se va a describir el algoritmo utilizado para realizar un barrido modificando el ángulo de incidencia dentro del campo de visión del sensor, con el objetivo de obtener la respuesta del mismo en su rango completo.

Antes de explicar el propio algoritmo utilizado para realizar el barrido, se ha de definir la forma en la que se calcula la variación del ángulo de incidencia respecto al cero del sensor.

### 5.4.1 Variación del ángulo de incidencia

Tal y como se ha visto en el Capítulo 1, los sistemas de calibrado modifican el ángulo de incidencia de la luz incidente en el sensor con el objetivo de obtener la respuesta eléctrica del sensor y analizar estos resultados.

El ángulo en cada uno de los ejes se puede conocer a partir del desplazamiento realizado en la dirección de los mismos desde el punto de  $0^\circ$  del sensor. Como este punto ya ha sido obtenido en el apartado anterior, la siguiente figura refleja un esquema del cálculo de la modificación del ángulo.

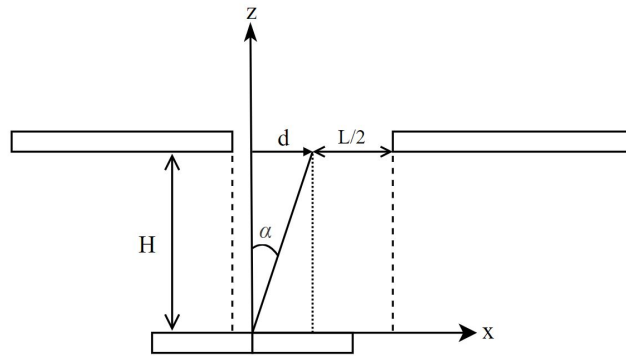


Figura 5.17 Variación del ángulo de incidencia.

Tras un desplazamiento  $d$  respecto al punto de  $0^\circ$ , el nuevo ángulo de incidencia de la luz incidente se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{d}{H}\right) \quad (5.1)$$

Siendo  $H$  la distancia de la fuente luminosa al sensor.

Se puede apreciar en la figura 5.17 que el cálculo del ángulo se realiza entre el eje  $Z$  y el centro de la ventana a través de la cual pasa la luz. En este caso, el ángulo calculado correspondería al ángulo en el eje  $X$ , sin embargo, el cálculo para el ángulo en el eje  $Y$  sería totalmente análogo realizando un desplazamiento en su dirección.

### 5.4.2 Método del barrido

Habiendo detectado el punto de  $0^\circ$  del sensor y definido la forma en la que se puede modificar el ángulo de incidencia, es momento de realizar un barrido dentro del campo de visión del sensor.

En primer lugar, se ha de calcular el número de pasos que se debe dar en cada movimiento para modificar el ángulo de incidencia un cierto número de grados. A partir de la expresión 5.1 se puede expresar el desplazamiento a realizar para modificar el ángulo de incidencia un valor  $\alpha$ :

$$d = H \cdot \tan(\alpha) \quad (5.2)$$



El barrido se realizará en modo *Full step*, por lo que, cada movimiento de un paso implicará un desplazamiento de  $2.5\mu m$ . Además, tras medir la distancia entre el sensor y la fuente de luz,  $H$ , se obtuvo un valor aproximado de  $0.55mm$ , resultando por tanto en la siguiente expresión para calcular el número de *steps* necesarios para modificar el ángulo un valor  $\alpha$ :

$$steps = \frac{0.55 \cdot 10^{-3}}{2.5 \cdot 10^{-6}} \cdot \tan(\alpha) = 220 \cdot \tan(\alpha) \quad (5.3)$$

Una vez definida la forma en la que se calcularán los desplazamientos a realizar para modificar el ángulo de incidencia, se presentará a continuación el procedimiento seguido para realizar el barrido con un diagrama de flujo.

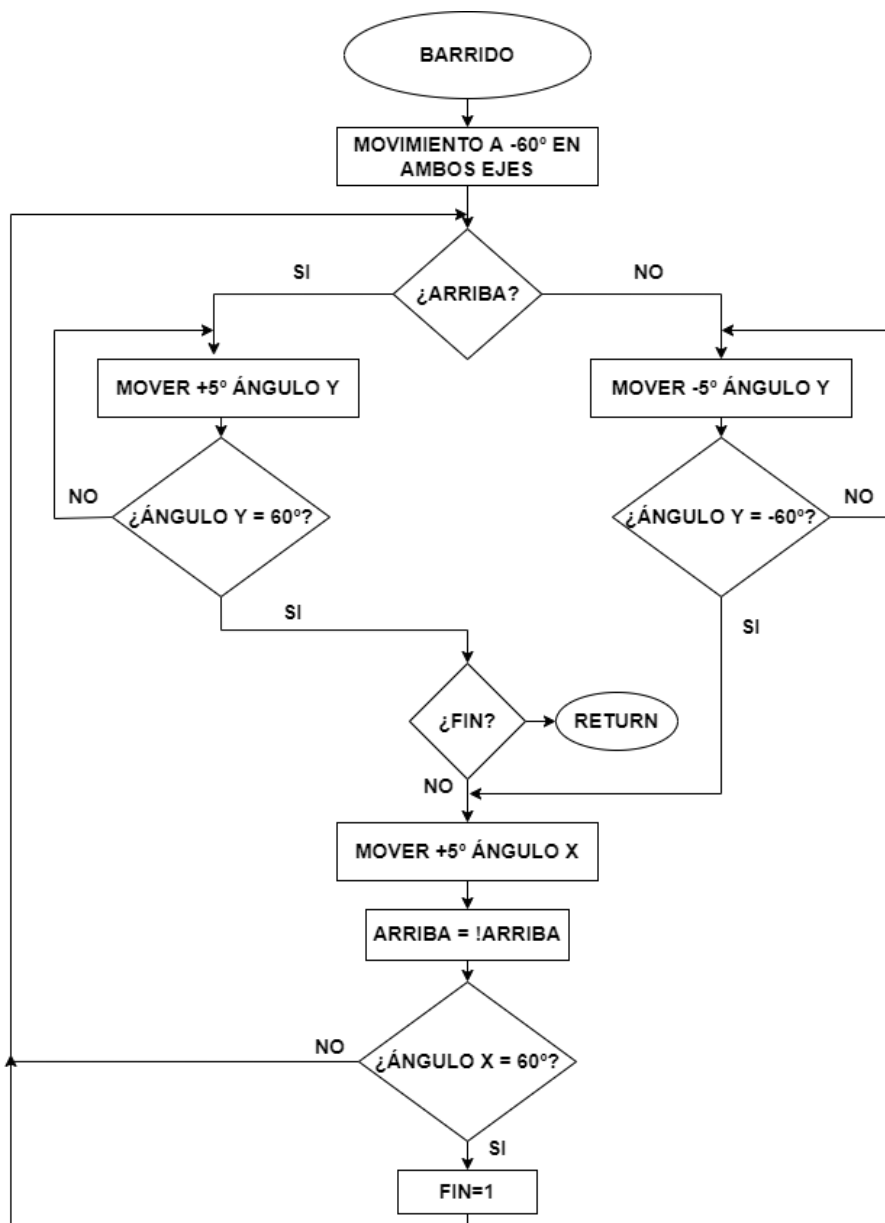


Figura 5.18 Diagrama de flujo del algoritmo del barrido.

Este diagrama de flujo se puede resumir en tres pasos:

### Paso 1. 60° en ambos ejes

En el paso 1, desde el punto calculado en el calibrado donde el sensor mide  $0^\circ$ , se desplazará el posicionador hasta aplicar un ángulo de  $-60^\circ$  en ambos ejes, siendo este el punto de inicio del barrido. Concretamente, se desplazará el posicionador en ambos ejes 381 pasos, según la expresión 5.3.

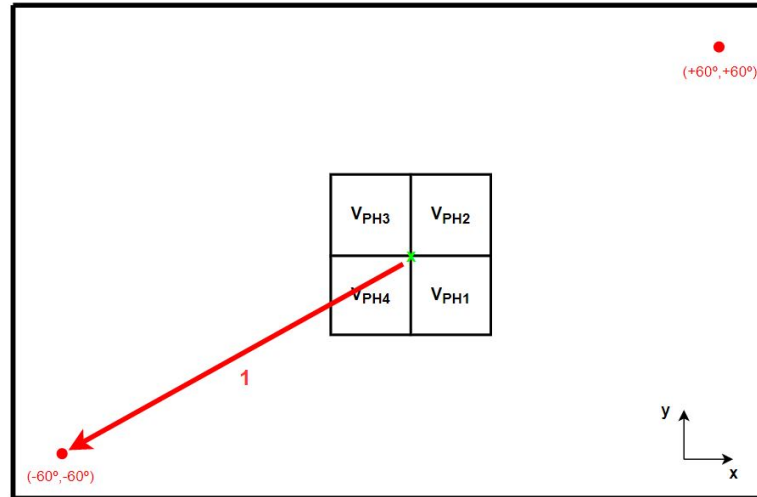


Figura 5.19 Paso 1 del método del barrido.

### Paso 2. Aumento o disminución del ángulo en el eje Y

En el paso 2, en función de si se debe aumentar o disminuir el ángulo en el eje Y, se realizará un movimiento en un sentido o en otro de este eje. De nuevo, a partir de la expresión 5.3 se han calculado los *steps* necesarios para incrementar el ángulo. Concretamente, tanto el ángulo en este eje como en el eje X, se irán aumentando de  $5^\circ$  en  $5^\circ$ .

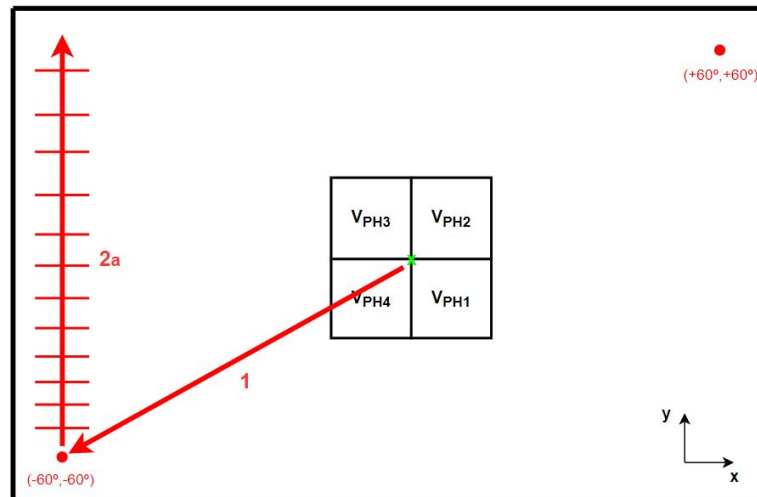


Figura 5.20 Paso 2 del método del barrido.

Una vez se hayan alcanzado  $+60^\circ$  o  $-60^\circ$  (en función del sentido del movimiento), se pasará al paso 3.

### Paso 3. Aumento del ángulo en el eje X

En el tercer paso, se aumentará siempre el ángulo en el eje X en  $5^\circ$ , suponiendo esto un movimiento en el sentido positivo de dicho eje según las referencias indicadas en los diagramas.

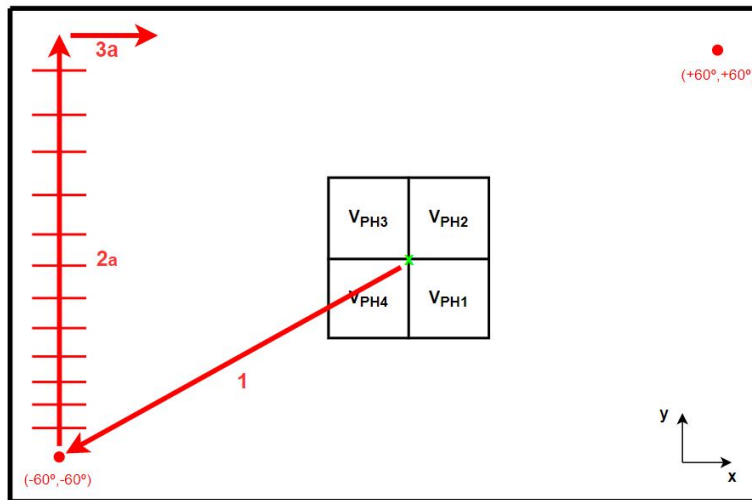


Figura 5.21 Paso 3 del método del barrido.

### Iteración

Una vez se haya completado el paso 3, se comprobará si se han alcanzado ya los  $60^\circ$  en el eje X, originándose dos situaciones:

- Se han alcanzado  $60^\circ$ : Se pasará una última vez al paso 2 en el que se realizará un movimiento vertical ascendente hasta alcanzar el punto final.
- No se han alcanzado  $60^\circ$ : Se pasará también al paso 2 pero sin suponer esta una última vez. Se realizará un movimiento vertical ascendente o descendente en función de si se parte de  $+60^\circ$  o  $-60^\circ$  en el eje Y.

El punto final del barrido se da cuando existe en ambos ejes un ángulo de  $+60^\circ$

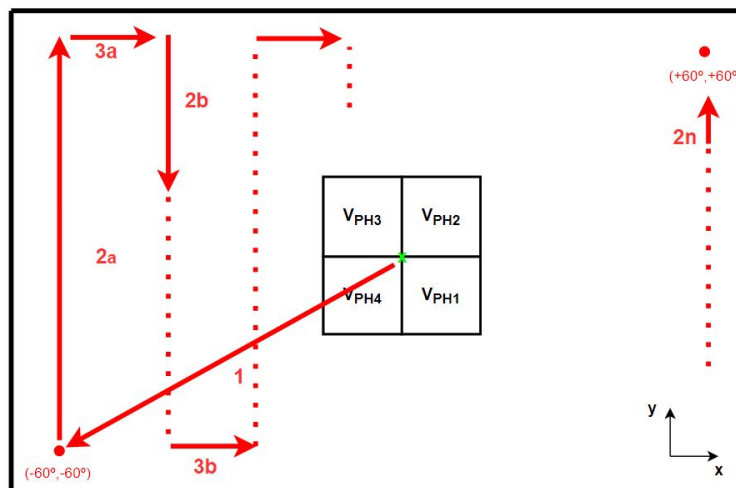


Figura 5.22 Iteraciones del método del barrido.

## 5.5 Control del posicionador XY

Una vez diseñados y explicados los algoritmos que se quieren implementar para los distintos modos de funcionamiento del sistema de calibración, se va a explicar en esta sección las distintas estrategias utilizadas en este trabajo para realizar el propio control del posicionador.

En concreto, se han utilizado dos *software* diferentes con este propósito: XILab y MATLAB.

### 5.5.1 XILab

**XILab** es un programa que proporciona una interfaz gráfica de control para dispositivos de posicionamiento multiaxiales y multidimensionales, dejando a elección del usuario el uso de programación. Además, permite exportar datos tanto del posicionador como de los motores para su tratamiento externo.

Previamente a la construcción de las estructuras diseñadas en el Capítulo 3, se quiso tener un primer acercamiento al funcionamiento real del posicionador sin entrar en aspectos de programación o de la estructura interna del controlador. Para ello, este *software* es ideal.

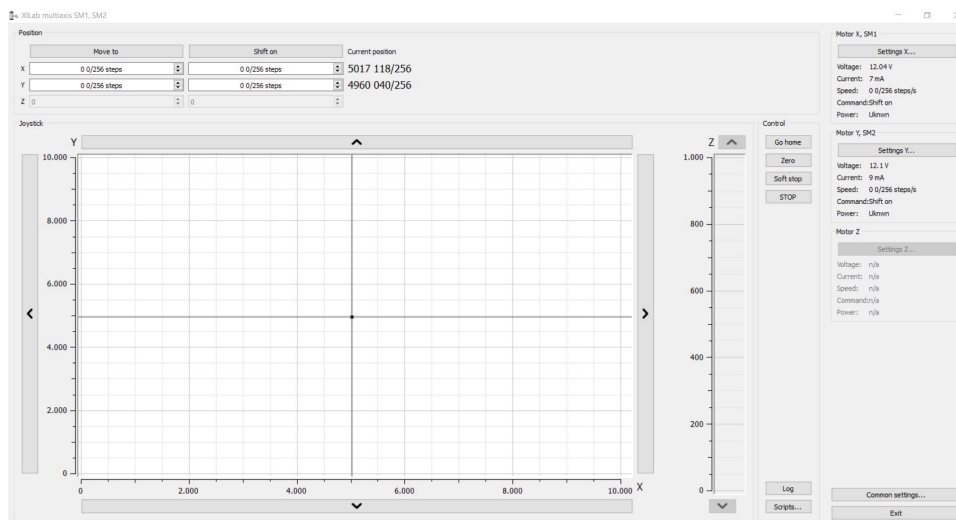


Figura 5.23 Interfaz gráfica de XILab.

XILab permite un control manual del controlador mediante dos herramientas: *Joystick* y selectores de posición.

Dentro del controlador se establece un sistema de referencia cuyo origen es modificable y cuyas unidades de medida son los *steps* de los motores. Mediante el *Joystick* se puede definir el punto dentro de este sistema de referencia donde se quiere que se sitúe el posicionador. Esto se puede hacer directamente seleccionando el punto en la cuadrícula o utilizando los botones auxiliares situados en torno a esta que permiten realizar el movimiento en cada uno de los ejes por separado.

Por otro lado, los selectores de posición permiten modificar la posición con una mayor precisión, seleccionando directamente la posición a la que el dispositivo se debe desplazar o realizando un desplazamiento en torno a la posición actual. Se podrá modificar la posición, a diferencia de con el *Joystick*, con una precisión máxima de 1/256 pasos, pudiendo ser esta modificable por el resto de valores que el controlador permite (1/2 paso, 1/4 paso, etc.).

Otras opciones como la detención, establecimiento del origen del sistema de referencia o modificar la configuración del posicionador (velocidad, límites, frenado, etc.) también son posibles con XILab.

### 5.5.2 MATLAB

Una vez que tanto la adquisición de datos de la respuesta eléctrica del sensor como el diseño de la interfaz gráfica se realizaron en MATLAB, con el objetivo de integrar el sistema en un mismo *software*, se investigaron las estrategias de control del posicionador con dicha herramienta..

En primer lugar, el uso de MATLAB como herramienta de control es posible gracias a la librería **libximc**, una librería multiplataforma que permite manejar *hardware* a través de las interfaces USB 2.0, RS323 y Ethernet y, en concreto, el controlador del posicionador utilizado en este trabajo.

Son tres las principales funcionalidades que han sido implementadas gracias a esta librería para poder utilizar el posicionador en el sistema de calibración:

#### Comunicación posicionador-MATLAB

Será necesario en primer lugar establecer una conexión entre el controlador del posicionador y MATLAB. Con la librería **libximc** este proceso se reduce al empleo de tres funciones que permiten: detectar los posibles dispositivos y enumerarlos, iniciar la conexión y cerrar la conexión.

La orden **calllib** de MATLAB es crucial para llamar a funciones de librerías externas, siendo la implementación prácticamente inmediata.

---

#### Código 5.1 Comunicación posicionador-MATLAB.

```
%Configuración de detección
probe_flags = 1 + 4;
enum_hints = 'addr=192.168.1.1,172.16.2.3';
%Detección de los dos ejes del posicionador
device_names = ximc_enumerate_devices_wrap(probe_flags, enum_hints);
device_name = device_names{1,1};
device_name_2 = device_names{1,2};
%Iniciar conexión
device_id = calllib('libximc','open_device', device_name);
device_id_2 = calllib('libximc','open_device', device_name_2);
%Finalizar conexión
device_id_ptr = libpointer('int32Ptr', device_id);
device_id_2_ptr = libpointer('int32Ptr', device_id_2);
calllib('libximc','close_device', device_id_ptr);
calllib('libximc','close_device', device_id_2_ptr);
```

#### Configuración del posicionador

Tras la correcta conexión con el posicionador, interesa ahora configurar diferentes parámetros del mismo que influyan en el comportamiento de su movimiento, y, de esta forma, en el control de la incidencia luminosa.

En este trabajo se ha necesitado modificar las siguientes propiedades: velocidad, *step mode*, y límites.

Las dos primeras son fácilmente configurables a partir de dos funciones externas que hacen uso de la librería y que fueron proporcionadas por el fabricante.

En el caso de los límites de posición, se establecieron directamente a partir de funciones de la librería que permiten extraer información del posicionador y modificar los parámetros de configuración del mismo. Fue necesario alterar el valor de los *flags* de la configuración de los bordes (*edges*) para limitar el rango de movimiento.

**Código 5.2** Ejemplo modificación de límites.

```

%Estructuras auxiliares
dummy_struct = struct();
edges = libpointer('edges_settings_t',dummy_struct);
%Get de la configuración de límites
[result,edges_settings] = calllib('libximc','get_edges_settings',device_id,
    edges);
%Establecer valor de los límites y flags
edges_settings.BorderFlags = 7;
edges_settings.LeftBorder = 4100;
edges_settings.RightBorder = -2800;
%Set de la configuración de límites
result = calllib('libximc','set_edges_settings',device_id,edges_settings);

```

**Control de movimiento**

Por último, la funcionalidad principal de esta librería que permite utilizar el posicionador en el sistema de calibración es el propio control del movimiento.

Sin ir más allá de lo que se puede realizar con XILab, con MATLAB se modificará la posición de la misma forma: selección del punto concreto al que el eje se debe mover y desplazamiento en pasos o micropasos respecto a la posición actual del eje.

También se utilizará en algún caso, en el sistema de calibración diseñado, una función de la librería que permite asegurar que una posición ha sido alcanzada. Sin embargo, si se está realizando un control del posicionador en un programa que involucra otras tareas (como es el caso de este trabajo, en el que la respuesta eléctrica del sensor se está analizando también), hay que considerar que esta función detiene completamente el programa hasta que se haya detenido el posicionador.

**Código 5.3** Ejemplo control de movimiento.

```

%Movimiento a la posición 5450 en pasos
result = calllib('libximc','command_move',device_id,5450,0);
%Espera hasta que se haya alcanzado la posición
result = calllib('libximc','command_wait_for_stop',device_id,10);
%Desplazamiento de 1000 pasos
result = calllib('libximc','command_movr',device_id,1000,0);

```

A excepción del código del apartado 5.5.2, se ha utilizado en los ejemplos únicamente uno de los ejes para simplificar y reducir la longitud de los mismos. Puesto que en el sistema final se pretende un control del posicionador en el plano, será necesario acceder a ambos ejes.

Una vez descrita la forma en la que se puede realizar el control de la incidencia de luz y la adquisición de datos del sensor a través de MATLAB, la implementación de los algoritmos descritos en este capítulo se basa en utilizar estructuras tipo *state machine* que permiten describir en forma de código los distintos pasos de los métodos presentados en los diagramas de flujo.

# 6 Resultados

---

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos una vez implementado el sistema de calibración y los algoritmos descritos en el Capítulo 5. Además, se realizará una verificación del cumplimiento de los requerimientos establecidos en el Capítulo 2.

## 6.1 Resultados

El programa principal, una vez se realiza el barrido devuelve los resultados de todo el proceso, incluyendo el calibrado. Sin embargo, también se pueden representar por separado ambos procesos tal y como se mostrará a continuación.

A pesar de haber realizado numerosas pruebas para obtener conclusiones y observar el comportamiento de los algoritmos, se presentarán en este capítulo únicamente los resultados de una de las pruebas realizadas, pues estos son bastante similares entre ellas. Las conclusiones finales de todas las pruebas realizadas se observarán en la sección 6.2, mediante el cumplimiento de los requerimientos a partir de los resultados obtenidos en general.

### 6.1.1 Resultados de la calibración

A continuación, se van a representar los resultados del proceso de calibración.

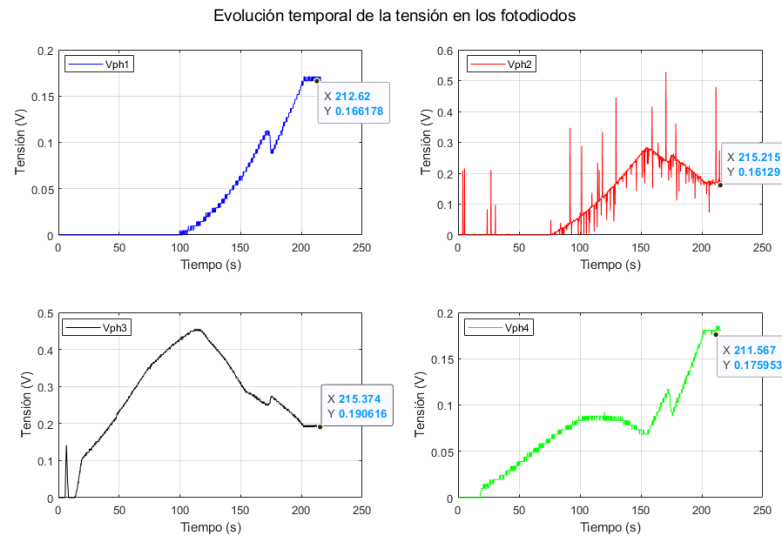
Por una parte, se representará la evolución de la tensión de los fotodiodos durante el calibrado, con el objetivo de visualizar la forma en la que varía la tensión mediante el aumento o disminución del área iluminada en los distintos pasos del algoritmo, así como el valor que estas tienen una vez se haya detectado el cero del sensor.

Se puede observar en la figura 6.1 que el fotodiodo 3 comienza a proporcionar una tensión no nula antes que ningún otro fotodiodo como consecuencia de la búsqueda de su excitación en el paso 2 del método de calibración.

Por otro lado, existe una analogía en la evolución de la tensión en los fotodiodos superiores (2 y 3) y en los inferiores (1 y 4) aunque desplazadas en el tiempo, fruto de una excitación idéntica de los mismos.

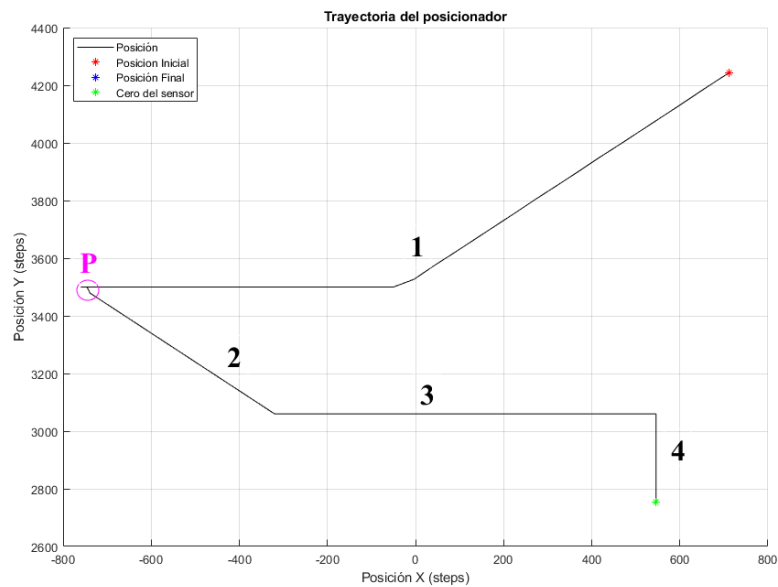
En un último instante, cuando el algoritmo se detiene, las diferencias entre las tensiones de los fotodiodos es de algo más de 20 mV en el peor caso y prácticamente nula en el mejor caso.

Cabe destacar también el comportamiento ruidoso que se puede observar en la tensión del fotodiodo 2. Este comportamiento se ha tenido durante todas las pruebas realizadas. La causa de dicho ruido es la ausencia de un condensador en la salida del fotodiodo, afectando al ruido superpuesto (se puede observar en la figura 4.2). Para evitar que esto supusiese un problema en el funcionamiento del algoritmo, se tuvo en cuenta vía *software* la posible aparición de valores instantáneos erróneos en el fotodiodo 2.



**Figura 6.1** Evolución de la tensión en los fotodiodos durante el calibrado.

Por otra parte, se ha representado también la trayectoria realizada por el posicionador durante todo el proceso de calibración, habiéndose indicado cada uno de los pasos en la propia representación, así como el punto inicial, el punto conocido desde el que se parte en el paso 2 y el punto del cero del sensor obtenido.

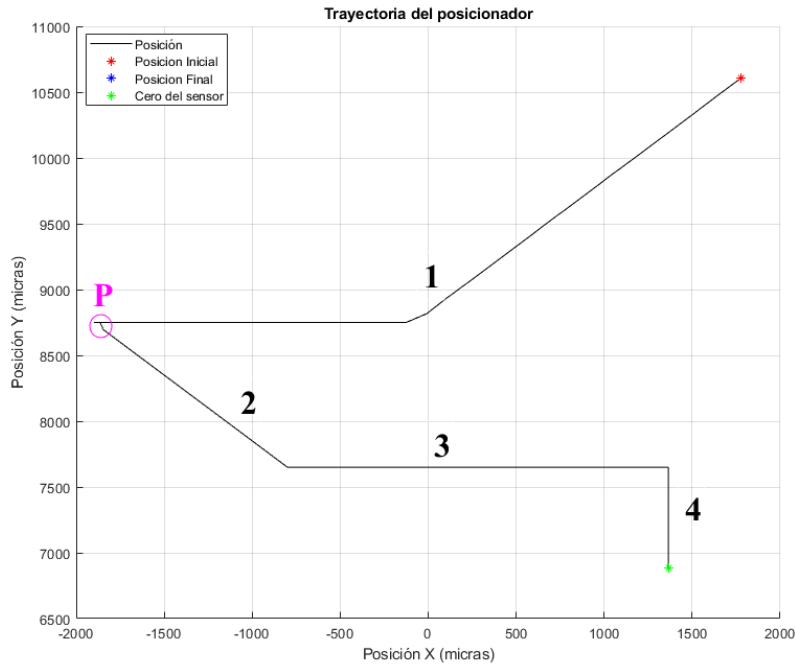


**Figura 6.2** Trayectoria del posicionador durante el calibrado.

Se pueden observar perfectamente los movimientos descritos en la sección 5.3: diagonal en el paso 2, horizontal en el paso 3 y vertical en el paso 4.

En la figura 6.2 se ha representado la posición en unidades de *steps* de los motores paso a paso pero puede resultar de utilidad también representar esta trayectoria en micras.





**Figura 6.3** Trayectoria del posicionador durante el calibrado en micras.

En la representación en micras lo interesante no es atender a la posición absoluta de los distintos puntos (punto inicial, punto P o cero del sensor) si no los desplazamientos entre ellos. El sistema de referencia con el que se han representado los resultados, aunque siempre el mismo, es arbitrario, pues carece de sentido establecer un origen concreto sabiendo que la búsqueda del cero del sensor se puede realizar desde cualquier punto dentro de los límites del posicionador.

Las coordenadas del punto del cero del sensor obtenido en *steps* son: **(546, 2754)**. A partir de este punto, se realizará un barrido en todo el campo de visión del sensor obteniendo los resultados presentados en la siguiente sección.

ÁNGULOS MEDIDOS:	Ángulo X (°)	Ángulo Y (°)
	-3.676298	3.676298

**Figura 6.4** Ángulos obtenidos en el cero.

### 6.1.2 Resultados del barrido

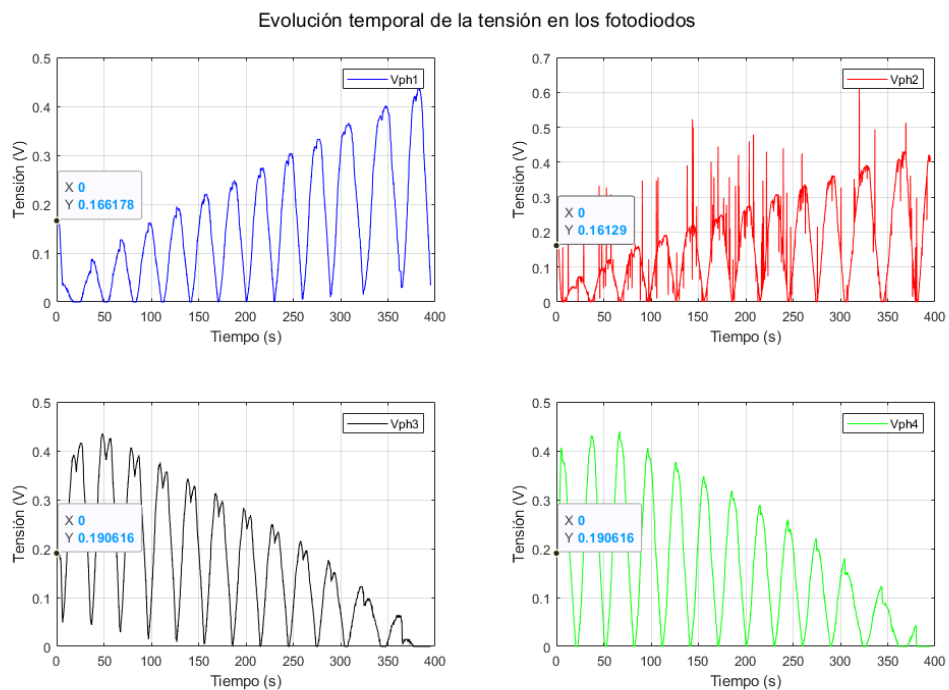
Una vez obtenido el punto del cero del sensor, se representarán a continuación los resultados obtenidos tras el barrido realizado en torno a este punto.

De nuevo, se representará la evolución de la tensión de los fotodiodos durante el barrido.

Se puede observar en la figura 6.5 que las tensiones en el instante inicial son prácticamente idénticas a las medidas en el instante final del proceso de calibración, pues el punto es el mismo. La diferencia existente puede ser debida a imprecisiones en el convertidor A/D del microcontrolador o al propio ruido que tiene el sensor.

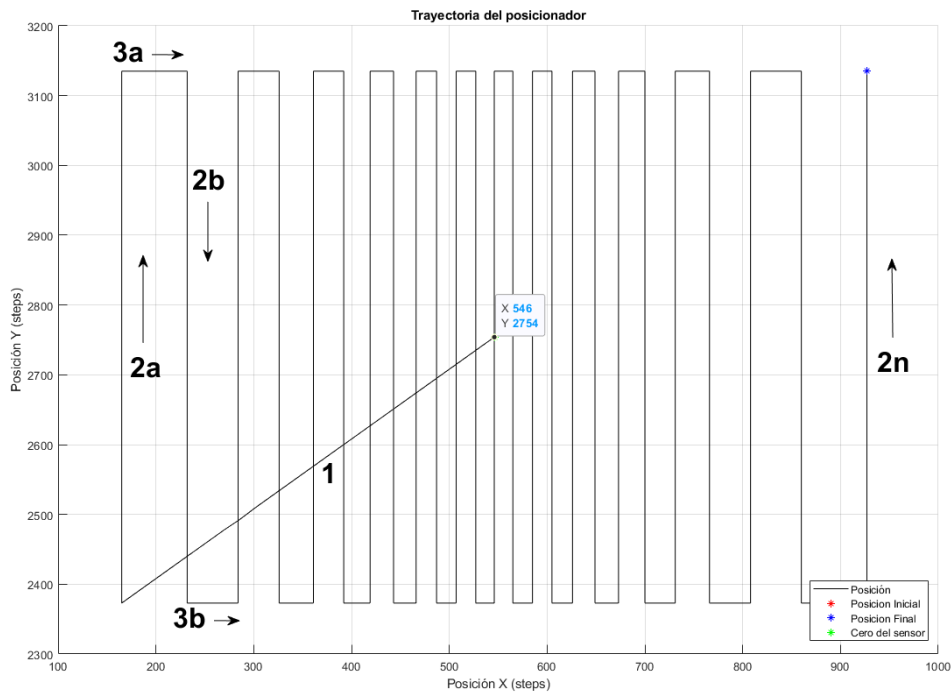
La evolución de cada uno de los fotodiodos refleja el valor de tensión que tiene cada uno de ellos en función del punto del barrido en el que se encuentra la luz incidente, y, por tanto, en función del ángulo de incidencia.

El comportamiento ruidoso sigue presente en el fotodiodo 2.



**Figura 6.5** Evolución de la tensión en los fotodiodos durante el barrido.

Al igual que en el caso de la calibración, la representación de la trayectoria del posicionador refleja de forma más clara como funciona el algoritmo implementado y es también una manera directa de comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

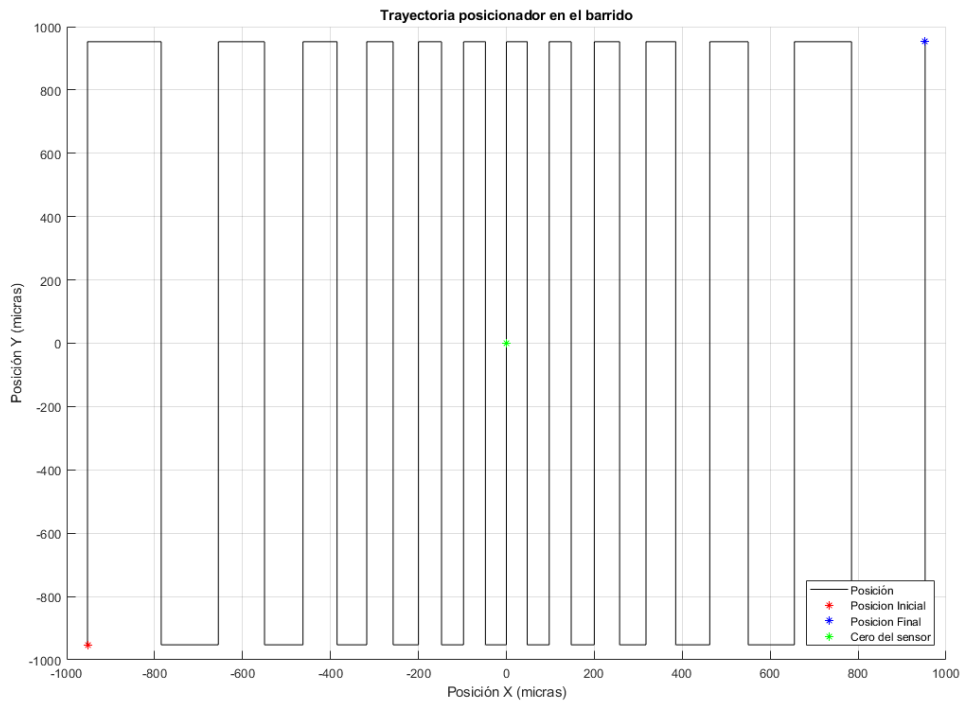


**Figura 6.6** Trayectoria del posicionador durante el barrido.

Mediante la figura 6.6 se pueden observar los distintos pasos del barrido de caracterización explicado en la sección 5.4.2. Las coordenadas del punto inicial coinciden con las coordenadas obtenidas en el proceso de calibración, pues el barrido debe ser realizado en torno al punto donde se encontró el cero del sensor.

El hecho de que el número de pasos necesarios para variar el ángulo de incidencia desde el cero no sea constante (aspecto que se vió con la expresión 5.1) se puede discernir en la anchura de los movimientos en el eje X que se realizaron durante el barrido.

Por otro lado, se ha representado también la trayectoria en micras, centrando ahora los ejes en el punto del cero del sensor con el objetivo de apreciar los desplazamientos realizados en en ambos ejes en dichas unidades, más intuitivas que los *steps*.



**Figura 6.7** Trayectoria del posicionador durante el barrido en micras.

Un aspecto interesante que se puede observar en la figura 6.9 es el hecho de que para modificar el ángulo de incidencia de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  solamente es necesario realizar un desplazamiento de la fuente de luz de menos de 1mm.

En este caso, se ha eliminado de la gráfica el paso 1 del método del barrido para representar únicamente los movimientos dentro del campo de visión de los que se obtendrán resultados numéricos.

## 6.2 Cumplimiento de los requerimientos

En esta sección se van a ir analizando uno a uno los requerimientos especificados en el Capítulo 2 comprobando si han sido cumplidos o no, realizando al final una tabla resumen con las conclusiones obtenidas.

### 6.2.1 Intensidad luminosa

Con la elección de un LED de alta intensidad como fuente de luz (sección 3.2) se intentó buscar que los fotodiodos se viesen excitados de forma correcta, proporcionando valores adecuados de tensión.

A partir de los resultados obtenidos en la sección 6.1 se puede observar que las tensiones son suficientes para tomar conclusiones acerca del comportamiento de los fotodiodos. Con una fuente de luz con mayor intensidad luminosa o con un conducto de luz más adecuado, se podrían haber obtenido quizás valores de tensión más elevados.

### 6.2.2 Integración

MATLAB ha sido el único software utilizado para la realización de las dos tareas fundamentales del sistema de calibración: adquisición de datos y control de incidencia luminosa.

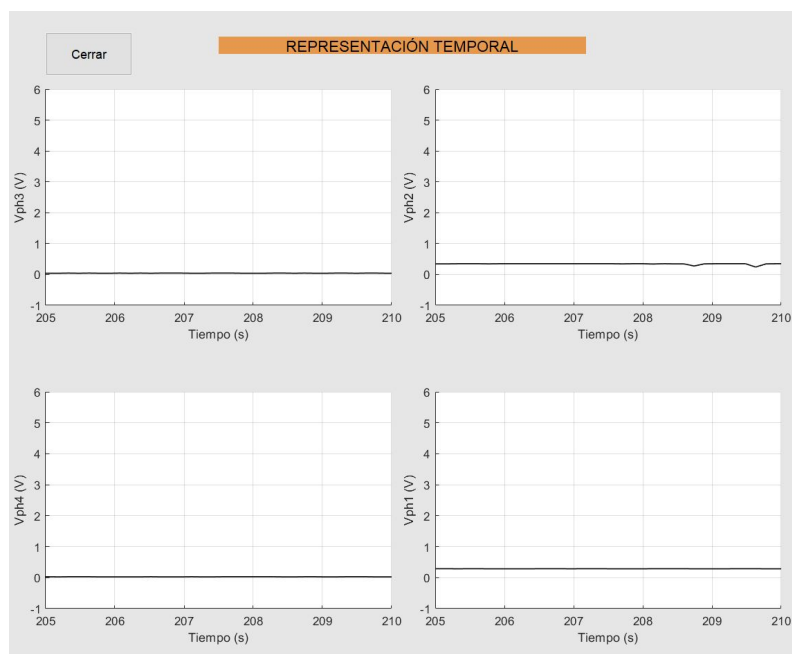
La compatibilidad del microcontrolador Arduino y la existencia de una librería adaptada directamente con este *software* permitieron un sencillo proceso de integración de las herramientas.

### 6.2.3 Interfaz gráfica

Tal y como se ha presentado en la figura 5.2, se ha diseñado una interfaz gráfica que permite el control del posicionador en diferentes modos de funcionamiento y la adquisición de datos del proceso de calibración.

### 6.2.4 Representación en tiempo real

Además de las representaciones gráficas obtenidas a posteriori con el sistema diseñado (presentadas en el apartado 6.1), es posible observar la respuesta eléctrica del sensor en tiempo real a través de la interfaz gráfica durante todo el proceso de calibración, barrido o durante la excitación manual.



**Figura 6.8** Evolución temporal en tiempo real de la tensión.

### 6.2.5 Calibración

Tras la descripción del método diseñado para la obtención del cero del sensor en la sección 5.3 y la obtención de los resultados del mismo en la sección 6.1.1, se puede concluir que el sistema cumple correctamente con este requerimiento.

Analizando más en profundidad dicho cumplimiento, a partir de las múltiples pruebas realizadas con el método de búsqueda del cero implementado, el error obtenido en el proceso es, tanto en tensión como en ángulo, de aproximadamente:

- En tensión: Diferencia máxima de 20mV entre dos fotodiodos.
- En ángulo: Error de 5° en el peor caso.

ÁNGULOS MEDIDOS:	Ángulo X (°)	Ángulo Y (°)
	-2.269408	2.269408

Figura 6.9 Ejemplo de ángulos obtenidos en el cero.

### 6.2.6 Barrido

Para conseguir realizar correctamente el barrido dentro del campo de visión del sensor, se realizaron los cálculos necesarios para obtener el desplazamiento correspondiente a una variación del ángulo determinada en la sección 5.4.1. Con esta, se concluyó que el paso debería ser variable para poder cubrir todo el FOV modificando en cada paso cada ángulo en 5°.

Tras el diseño del método en la sección 5.4 y la presentación de los resultados en la sección 6.1.2, se puede concluir que el sistema cumple correctamente con este requerimiento.

### 6.2.7 Límites de movimiento

Con el objetivo de proteger las estructuras y evitar un uso incorrecto del modo manual, así como subsanar posibles fallos en el sistema, se han establecido límites en el rango de movimiento del posicionador.

Concretamente, los límites establecidos para ambos ejes en *steps* son:

- Eje X: Min: -2800; Máx: 4100
- Eje Y: Min: 1500; Máx: 5500

A partir de las trayectorias que realiza el posicionador (figuras 6.2 y 6.6) se puede concluir que estos límites permiten un correcto desempeño de las estrategias de calibración y barrido.

### 6.2.8 Fichero de texto del barrido

Con el objetivo de que este sistema sirva de apoyo para una futura caracterización del sensor solar, a partir del barrido realizado se ha obtenido un fichero de texto en el que se proporcionan los valores de tensión de los cuatro fotodiodos para cada par de ángulos incidentes en los ejes X e Y.

En la figura 6.10 se puede observar una captura del fichero de texto obtenido tras el barrido. A pesar de que se haya representado únicamente una parte del proceso, este fichero cubre todos los ángulos desde -60° a +60° con un paso de 5° en ambos ejes.

```

10 25 0.127 0.239 0.21 0.112
10 30 0.117 0.249 0.22 0.098
10 35 0.103 0.269 0.235 0.083
10 40 0.083 0.279 0.244 0.068
10 45 0.064 0.288 0.249 0.059
10 50 0.044 0.288 0.249 0.034
10 55 0.029 0.288 0.239 0.024
10 60 0 0.283 0.23 0
15 60 0 0.298 0.215 0
15 55 0.01 0.298 0.22 0.01
15 50 0.02 0.303 0.22 0.01
15 45 0.029 0.308 0.225 0.015
15 40 0.034 0.308 0.225 0.02
15 35 0.044 0.303 0.225 0.024
15 30 0.049 0.303 0.23 0.034
15 25 0.068 0.303 0.235 0.049
- - - - -

```

**Figura 6.10** Captura del fichero de texto del barrido.

El formato del fichero de texto es el siguiente:

$$[AngX \ AngY \ V_{ph1} \ V_{ph2} \ V_{ph3} \ V_{ph4}]$$

Siendo AngX y AngY los ángulos en cada eje y  $V_{ph1}, V_{ph2}, V_{ph3}, V_{ph4}$  las tensiones de cada fotodiodo.

Este fichero permitirá el posterior análisis de los datos obtenidos durante el proceso de calibración.

### 6.2.9 Tabla resumen

**Tabla 6.1** Resumen del cumplimiento de requisitos.

Requerimiento	Verificado	Comentarios
Intensidad luminosa	✓	Suficiente pero mejorable
Integración	✓	
Interfaz gráfica	✓	
Representación en tiempo real	✓	
Calibración	✓	Error $\pm 5^\circ$
Barrido	✓	
Límites de movimiento	✓	
Fichero de texto del barrido	✓	





## 7 Conclusiones

---

**D**urante el desarrollo de este trabajo, se profundizó en la comprensión del funcionamiento de los sensores solares de cuatro cuadrantes, así como en la importancia de su calibración.

Partiendo únicamente de un posicionador XY y del propio sensor, y con el objetivo de diseñar un sistema completo de calibración en torno a estos, fue necesario el empleo de técnicas CAD para crear estructuras que permitiesen integrar todos los elementos en un todo, entendiendo la funcionalidad de cada uno de ellos por separado.

El uso de un dispositivo como el posicionador, totalmente desconocido previamente al desarrollo de este trabajo, supuso un reto en la investigación del funcionamiento del mismo, así como en la programación necesaria para su control.

Los algoritmos diseñados para los procesos de calibración son el fruto de la comprensión total de las herramientas de trabajo disponibles y sus resultados se deben a las numerosas pruebas y ajustes que fueron necesarios realizar.

En cuanto a la búsqueda del cero del sensor solar, el método consiguió encontrar este punto con relativa precisión a pesar de los inconvenientes del ruido tanto del convertidor A/D del microcontrolador utilizado, como de uno de los fotodiodos.

El barrido realizado en torno al punto obtenido en la calibración del sensor supone la finalización del trabajo, obteniendo un fichero con un formato utilizado en el ambiente profesional para el calibrado de este tipo de sensores.

Líneas futuras de ampliación podrían ser: el empleo de una fuente de luz con una mayor intensidad luminosa, observándose así niveles de tensión diferentes y posiblemente más cercanos a los obtenidos en un sistema de calibración profesional, el refinamiento o la sustitución del método de calibración y el diseño de estructuras que permitan el uso del sistema con otros modelos de sensores solares, entre otras.



# Índice de Figuras

---

1.1	Sputnik I	1
1.2	SSOC-A60 de Solar MEMS	2
1.3	Esquema de medida del ángulo de incidencia [15]	2
1.4	Layout de un fotodiodo de cuatro cuadrantes [5]	3
1.5	HAAPS [15]	4
3.1	Esquema del corte simplificado del sistema: 1- Fuente de luz; 2-Conducto; 3-Cubierta del posicionador; 4-Posicionador XY; 5-Base del sensor; 6- Sensor solar; 7-Base atornillada	9
3.2	LED C503D-WAN-CCbEb151	10
3.3	Esquema eléctrico de la fuente de luz	11
3.4	Intensidad luminosa relativa frente a corriente [10]	11
3.5	Ventana de acople al sensor	11
3.6	Análisis ángulo de apertura de salida	12
3.7	$f(x) = \tan^{-1}(x)$	13
3.8	Análisis de la distancia del sensor a la fuente de luz	13
3.9	Vista isométrica	15
3.10	Vista isométrica y planta del modelo en 3D del conducto	15
3.11	Creality Ender 3 [3]	15
3.12	Conductos de luz impresos en 3D	16
3.13	Vista isométrica	17
3.14	Vista isométrica y planta del modelo en 3D de la cubierta	17
3.15	Cubierta en madera DMF	17
3.16	Situación desfavorable	18
3.17	Tapa modificada	18
3.18	Vista isométrica	19
3.19	Vista isométrica y planta del modelo en 3D de la primera estructura de la base	19
3.20	Vista isométrica	20
3.21	Vista isométrica y planta del modelo en 3D de la segunda estructura de la base	20
3.22	Primera estructura impresa en 3D	20
3.23	Segunda estructura impresa en 3D	20
3.24	Base del sensor completa	21
3.25	Posicionador 8MTF de Standa [19]	21
3.26	Controlador 8SMC4-USB-B9-2 [20]	22
3.27	Sensor alojado en la base	23
3.28	Estructura adicional	23
3.29	Vista isométrica	23
3.30	Estructura final del conducto de luz	23
3.31	Vista isométrica	24
3.32	Estructura final del conducto de luz	24
3.33	Sensor a través de la ranura	24
3.34	Sistema completo	24

4.1	Detalle fotodiodos sensor	25
4.2	Detalle del sensor NANO-ISSX	25
4.3	Sistema de referencia de ejes del sensor [12]	25
4.4	Esquema de funcionamiento del sensor [12]	26
4.5	Valores del parámetro C para cada modelo	26
4.6	Cables multiplanares soldados	27
4.7	Arduino UNO [2]	28
4.8	Logo de MATLAB	28
4.9	Conexión sensor-arduino	29
5.1	Esquema de la función del programa	31
5.2	Interfaz gráfica del programa principal	32
5.3	Ángulos medidos en la interfaz	33
5.4	Selección de modos de funcionamiento	33
5.5	Control manual	33
5.6	Número de pasos en el modo manual	34
5.7	Ángulos aplicados en la interfaz	34
5.8	Vista isométrica	34
5.9	Estructura final del conducto de luz	34
5.10	Estructura final del conducto de luz	34
5.11	Estados del programa	34
5.12	Diagrama de flujo del algoritmo de calibrado	35
5.13	Paso 1 del algoritmo de calibración	36
5.14	Paso 2 del algoritmo de calibración	36
5.15	Paso 3 del algoritmo de calibración	37
5.16	Paso 4 del algoritmo de calibración	37
5.17	Variación del ángulo de incidencia	38
5.18	Diagrama de flujo del algoritmo del barrido	39
5.19	Paso 1 del método del barrido	40
5.20	Paso 2 del método del barrido	40
5.21	Paso 3 del método del barrido	41
5.22	Iteraciones del método del barrido	41
5.23	Interfaz gráfica de XILab	42
6.1	Evolución de la tensión en los fotodiodos durante el calibrado	46
6.2	Trayectoria del posicionador durante el calibrado	46
6.3	Trayectoria del posicionador durante el calibrado en micras	47
6.4	Ángulos obtenidos en el cero	47
6.5	Evolución de la tensión en los fotodiodos durante el barrido	48
6.6	Trayectoria del posicionador durante el barrido	49
6.7	Trayectoria del posicionador durante el barrido en micras	50
6.8	Evolución temporal en tiempo real de la tensión	51
6.9	Ejemplo de ángulos obtenidos en el cero	52
6.10	Captura del fichero de texto del barrido	53

# Índice de Tablas

---

6.1 Resumen del cumplimiento de requisitos

53



# Índice de Códigos

---

4.1	Lectura de datos de Arduino	29
5.1	Comunicación posicionador-MATLAB	43
5.2	Ejemplo modificación de límites	44
5.3	Ejemplo control de movimiento	44





# Bibliografía

---

- [1] Standa , *8smc4-usb specifications*, <https://doc.xisupport.com/en/8smc4-usb/8SMCn-USB/About/Specifications.html>.
- [2] Proyecto Arduino, *Arduino uno r3 características*, <https://proyectoarduino.com/arduino-uno-r3/>.
- [3] Creality, *Ender-3 3d printer*, [https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer?spm=..page\\_1967279.products\\_display\\_1.1&spm\\_prev=..index.header\\_1.1](https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer?spm=..page_1967279.products_display_1.1&spm_prev=..index.header_1.1), 2018.
- [4] John L. Crassidis F. Landis Markley, *Fundamentals of spacecraft attitude determination and control*, 1 ed., Space Technology Library, 2014.
- [5] Jose M. Quero Carmen Aracil Leopoldo G. Franquelo, *Tracking control system using an incident radiation angle microsensor*, 1 ed., IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2007.
- [6] Jan Hales and Martin Pedersen, *Two-axis moems sun sensor for pico satellites*, (2002).
- [7] Jan H. Hales and Martin Pedersen, *Two-axis moems sun sensor for pico satellites*, 1 ed., Technical University of Denmark (DTU), 2002.
- [8] Impresoras3D, *Impresora 3d creality ender 3*, <https://www.impresoras3d.com/producto/impresora-3d-creality-ender-3/>, 2018.
- [9] Eckehard Strumpf Werner Reich Karin Schroter, *Development and application of a fine sun sensor*, 1 ed., International Conference on Space Optics, ESA, 1997.
- [10] Cree LED, *C503dwan leds datasheet*, <https://docs.rs-online.com/e3f8/0900766b812d38bc.pdf>, 2011.
- [11] A. Moreno M. Martínez Bogado M. Tamasi J. Di Santo M. Díaz Salazar, N. Kondratiuk, *Caracterización angular automatizada de sensores solares fotovoltaicos*, 1ª ed., Centro Atómico Constituyentes, 2018.
- [12] Solar MEMS, *Nano-issx datasheet*, [http://www.solar-mems.com/smt\\_pdf/NANO\\_Technical\\_Specifications.pdf](http://www.solar-mems.com/smt_pdf/NANO_Technical_Specifications.pdf).
- [13] Solar MEMS, *Diferentes usos de los sensores solares*, <https://www.solar-mems.com/diferentes-usos-de-los-sensores-solares/>, Junio 2021.
- [14] J García Ortega, CL Tarrida, JM Quero, FJ Delgado, P Ortega, L Castañer, M Reina, M Angulo, Y Morilla, and J García López, *Mems solar sensor testing for satellite applications*, 2009 Spanish Conference on Electron Devices, IEEE, 2009, pp. 345–348.
- [15] Pablo Ortega, Gema López-Rodríguez, Jordi Ricart, Manuel Domínguez, Luis M Castañer, José M Quero, Cristina L Tarrida, Juan García, Manuel Reina, Ana Gras, et al., *A miniaturized two axis sun sensor for attitude control of nano-satellites*, IEEE Sensors Journal **10** (2010), no. 10, 1623–1632.
- [16] Andrés Sánchez Rafael Villazón, Andrés Pinzón and David Rodríguez, *Luz materia, estrategias proyectuales para la iluminación de espacios arquitectónicos*, 1 ed., Ed. Uniandes. Universidad de los Andes, 2018.

- [17] John L. Champion Robert Osiander, M. Ann Garrison Darrin, *Mems and microstructures in aerospace applications*, 1<sup>a</sup> ed., CRC Press, 2006.
- [18] Pedro M Rodrigues and Pedro M Ramos, *Design and characterization of a sun sensor for the sseti-eseo project*, Proc. IMEKO XVIII World Congress, 2006.
- [19] Standa, *8mf - motorized xy scanning stage*, [https://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=311&prod=motrized\\_xy\\_scanning\\_stage&print=1](https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=311&prod=motrized_xy_scanning_stage&print=1).
- [20] Standa , *8smc4-usb information*, [https://doc.xisupport.com/en/8smc4-usb/8SMCn-USB/Technical\\_specification/Appearance\\_and\\_connectors/Two\\_axes\\_system.html](https://doc.xisupport.com/en/8smc4-usb/8SMCn-USB/Technical_specification/Appearance_and_connectors/Two_axes_system.html).
- [21] Roland Strietzel, *Two-dimensional calibration of a sun attitude sensor*, IFAC Proceedings Volumes **35** (2002), no. 1, 259–264.