

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

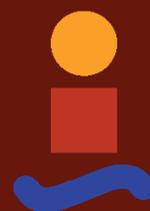
Sistema electrónico para la medición del vector solar.

Autor: Eloy Cabello Morales

Tutor: Juan García Ortega

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

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Sistema electrónico para la medición del vector solar.

Autor:

Eloy Cabello Morales

Tutor:

Juan García Ortega

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Sistema electrónico para la medición del vector solar.

Autor: Eloy Cabello Morales

Tutor: Juan García Ortega

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mi pareja

A mis amigos

Agradecimientos

Parece que mi camino está llegando a su fin. Han sido años muy intensos, formando parte de esta carrera universitaria. Es extraño mirar atrás después de tanto tiempo y ver todo lo que he logrado. Realmente es muy gratificante para mí. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos mis profesores que han formado parte de este recorrido, especialmente a mi tutor de TFG, Juan García Ortega. Gracias por tu atención y compromiso con este trabajo. Ha sido un verdadero placer trabajar contigo. Me has brindado la mejor comunicación posible y las facilidades necesarias.

En segundo lugar, quiero agradecer a todas las personas que han formado parte de mi trayecto en el ámbito universitario. Sin esas tardes de estudio y ocio, nada hubiera sido igual. Tomar la decisión de involucrarme socialmente ha sido una de las mejores decisiones de mi vida.

En tercer lugar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres. Ellos han hecho todo por mí en la vida, me han impulsado y motivado a seguir adelante. Han estado ahí cuando más los necesitaba y me han escuchado cuando lo he requerido. No estaría en el lugar en el que estoy ahora si no fuera por ellos.

En cuarto lugar, quiero agradecer a todos mis amigos fuera del ámbito universitario. Saben quiénes son, y sería interminable mencionarlos a todos. Quiero agradecerles por siempre estar ahí y ser una vía de escape para mí. Hemos pasado por mucho y lo que soy en gran medida se debe a ustedes. Quiero hacer una mención especial a mi gran amigo Curro, quien siempre me ha tendido una mano cuando lo he necesitado. Gracias por todo el tiempo que hemos pasado juntos aprendiendo y riéndonos. No sabría cómo recompensarte por todo lo que has hecho por mí.

Por último, quiero agradecer a mi pareja Alejandra, quien desde hace tiempo ha sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por todo el apoyo y por sacar siempre lo mejor de mí, incluso cuando yo mismo no creía en ello. Eres mi motor de vida.

En fin, como dicen, lo difícil vale la pena, y esto ha sido más que difícil. Parece que finalmente llega a su fin. Una vez más, gracias a todas las personas que han hecho esto posible, pero sobre todo gracias a mí mismo por creer en mí y por reconocer que la constancia es el pilar del éxito.

Eloy Cabello Morales

Sevilla, 2023

Resumen

En este trabajo se presenta un diseño para desarrollar un sistema electrónico portátil para la medición del vector solar. El sensor solar utilizado en este proyecto es el Sun Sensor NANO-ISSX/c. El objetivo principal es estudiar el comportamiento de este sensor y determinar los ángulos de incidencia solar a partir de las tensiones de entrada y las ecuaciones proporcionadas en el datasheet.

El diseño del sistema incluye varios componentes adicionales, como un teclado y una pantalla LCD, para proporcionar funcionalidad adicional. Estos componentes permiten una interfaz de usuario intuitiva y facilitan la visualización de los resultados obtenidos.

Durante el desarrollo del TFG, se llevará a cabo un análisis detallado del sensor solar y se evaluará su rendimiento en diferentes situaciones y ubicaciones. Se investigarán las proyecciones del ángulo de incidencia solar en función de las tensiones de entrada y se estudiarán diferentes escenarios para comprender mejor el comportamiento del sensor en diferentes condiciones.

El uso de Arduino Uno como plataforma de desarrollo ofrece flexibilidad y facilidad de programación, lo que permite la implementación de algoritmos y cálculos necesarios para determinar los ángulos de incidencia solar. Además, la adición de un teclado y una pantalla LCD mejora la experiencia del usuario y facilita la interacción con el sistema.

Este proyecto tiene una gran importancia debido a la creciente demanda de sistemas de energía solar y la necesidad de caracterizar y comprender el rendimiento de los sensores solares. El conocimiento obtenido a través de este estudio puede ser utilizado para mejorar la eficiencia y el diseño de sistemas solares, así como para optimizar su ubicación y orientación.

Abstract

In this work, a design is presented to develop a portable electronic system for measuring the solar vector. The solar sensor used in this project is the Sun Sensor NANO-ISSX/c. The main objective is to study the behavior of this sensor and determine the angles of solar incidence based on the input voltages and equations provided in the datasheet.

The system design includes various additional components, such as a keypad and an LCD screen, to provide additional functionality. These components enable an intuitive user interface and facilitate the visualization of the obtained results.

Throughout the development of the thesis, a detailed analysis of the solar sensor will be conducted, evaluating its performance in different situations and locations. The projections of the solar incidence angle will be investigated based on the input voltages, and different scenarios will be studied to better understand the sensor's behavior under varying conditions.

The use of Arduino Uno as the development platform offers flexibility and ease of programming, allowing for the implementation of necessary algorithms and calculations to determine the solar incidence angles. Additionally, the addition of a keypad and an LCD screen enhances the user experience and facilitates interaction with the system.

This project holds great importance due to the increasing demand for solar energy systems and the need to characterize and understand the performance of solar sensors. The knowledge gained through this study can be utilized to improve the efficiency and design of solar systems, as well as optimize their placement and orientation.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	1
1.3 <i>Motivación</i>	2
2 Estado del arte	3
2.1 <i>Introducción a los sensores solares para la medición de ángulos o vectores.</i>	3
2.1.1 <i>Importancia de la medición precisa de ángulos y vectores solares en sistemas solares.</i>	4
2.1.2 <i>Papel de los sensores solares en la optimización y rendimiento de los sistemas solares.</i>	4
2.2 <i>Principios de funcionamiento de los sensores solares para la medición de ángulos o vectores:</i>	5
2.2.1 <i>Métodos de detección y calibración utilizados en los sensores solares.</i>	5
2.2.2 <i>Principales características y especificaciones a considerar en estos sensores.</i>	6
2.3 <i>Tipos de sensores solares para la medición de ángulos o vectores:</i>	7
2.3.1 <i>Sensores de posición solar: Tecnologías y métodos utilizados para determinar la posición del sol en relación con un punto de medición.</i>	7
2.3.2 <i>Sensores de seguimiento solar: Sistemas y técnicas empleadas para mantener paneles solares u otros dispositivos orientados hacia el sol.</i>	7
2.4 <i>Aplicaciones de los sensores solares para la medición de ángulos o vectores:</i>	8
2.4.1 <i>Optimización de la orientación de paneles solares en sistemas fotovoltaicos.</i>	8
2.4.2 <i>Generación de mapas de radiación solar para evaluaciones de sitio y diseño de sistemas solares.</i>	9
2.4.3 <i>Seguimiento solar en aplicaciones de energía solar concentrada.</i>	9
2.5 <i>Desafíos y tendencias futuras en los sensores solares para la medición de ángulos o vectores</i>	9
2.5.1 <i>Miniaturización y mejora de la eficiencia energética de los sensores solares.</i>	9
2.5.2 <i>Integración de sensores con sistemas de control inteligentes.</i>	9
2.5.3 <i>Avances en la precisión y confiabilidad de las mediciones de ángulos y vectores solares.</i>	10
3 Metodología y descripción del sistema	11
3.1 <i>Metodología</i>	11
3.2 <i>Descripción del sistema electrónico</i>	11
4 Análisis de los componentes	15
4.1 <i>Sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c</i>	15
4.2 <i>Arduino Uno</i>	17
4.3 <i>Teclado 4x4</i>	18
4.3.1 <i>Funcionamiento</i>	18
4.3.2 <i>Aplicaciones</i>	18

4.4	<i>Pantalla LCD con I2C incorporado</i>	19
4.5	<i>Resistencia de 10k Ω</i>	21
4.5.1	<i>¿Qué es un "pulldown"?</i>	21
4.5.2	<i>¿Por qué se utiliza una resistencia de 10kΩ en un "pulldown"?</i>	21
4.5.3	<i>Aplicaciones de la resistencia de 10kΩ en "pulldown"</i>	22
4.6	<i>Protoboard</i>	22
4.7	<i>Fuente de alimentación</i>	22
4.7.1	<i>Alimentación a través de USB</i>	22
4.7.2	<i>Ventajas de la alimentación por USB</i>	23
4.7.3	<i>Consideraciones al usar la alimentación por USB</i>	23
5	Diseño e implementación del sistema a nivel hardware	25
5.1	<i>Diseño del esquemático</i>	25
5.2	<i>Integración de los componentes</i>	26
6	Diseño e implementación del sistema a nivel software	31
6.1	<i>Librerías utilizadas</i>	31
6.2	<i>Variables iniciales</i>	32
6.3	<i>Void Setup()</i>	33
6.4	<i>Void loop()</i>	34
7	Ensayos y análisis del sensor solar	41
7.1	<i>Pruebas : Escenario, configuración y metodología</i>	41
7.2	<i>Resultados</i>	43
7.3	<i>ENSAYO X=0° Y=0°</i>	44
7.4	<i>ENSAYO X=15° Y=0°</i>	50
7.5	<i>ENSAYO X=0° Y=15°</i>	53
7.6	<i>ENSAYO X=45° Y=0°</i>	56
7.7	<i>ENSAYO X=0° Y=45°</i>	59
8	Conclusiones y líneas futuras	65
	Referencias	12
	Anexo	16
	<i>Anexo 1: Código completo en Arduino</i>	16
	<i>Anexo 2: Datasheet del Sensor NANO-ISSX/c</i>	23
	<i>Anexo 3: Código Python para el archivo de datos.</i>	30
	<i>Anexo 4: Código Matlab para extracción de resultados</i>	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Valores de los parámetros de C acuerdo a el tipo del sensor NANO-ISSX

16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1	Sistema de seguimiento solar de 2 ejes [1]	4
Figura 2-2	Ángulo Azimutal [4]	4
Figura 2-3	Diferentes usos de los sensores solares [5]	5
Figura 2-4	Piranómetro destapado (mide radiación global) [9]	6
Figura 2-5	Tecnología SEO se concentra en controlar y redirigir más luz solar al interior de las celdas solares [11]	6
Figura 2-6	Células de pigmento fotosensible o células Grätzel. [14]	7
Figura 2-7	Sensor de inclinación F199 de Pepperl+Fuchs [16]	8
Figura 2-8	Rastreador solar fotovoltaico [19]	8
Figura 2-9	Sistemas Fresnel [23]	9
Figura 2-10	Descripción de la arquitectura que conforma el sistema MeshControl. [25]	10
Figura 3-1	Diagrama de Bloques de nuestro sistema 1	12
Figura 3-2	Diagrama de Bloques de nuestro sistema	12
Figura 4-1	Sun Sensor NANO-ISSX/c [28]	15
Figura 4-2	Microsensor del NANO-ISSX [28]	15
Figura 4-3	Cálculo de ángulos [28]	16
Figura 4-4	Conexión cables de Arduino [32]	17
Figura 4-5	Teclado utilizado.	18
Figura 4-6	Pantalla LCD 16x2 con I2C [39]	19
Figura 4-7	Microcontrolador del I2C [39]	19
Figura 4-8	Partes relevantes del I2C [39]	20
Figura 4-9	Schematic I2C [40]	20
Figura 4-10	Resistencia de 10k Ω [42]	21
Figura 4-11	Esquemático del pull-down	21
Figura 4-12	Protoboard utilizada	22
Figura 5-1	Esquema con los componentes.	25
Figura 5-2	Esquemático simplificado.	26
Figura 5-3	Implementación del teclado 4x4	27
Figura 5-4	Conexión de la pantalla LCD con I2C al Arduino	28
Figura 5-5	Implementación del sensor	29
Figura 5-6	Resistencias pull-down de 10k Ω	29
Figura 7-1	Soporte diseñado.	41
Figura 7-2	Sensor posicionado en la morsa 1.	42
Figura 7-3	Sensor posicionado en la morsa 2.	42

Figura 7-4 Datos recogidos en el ensayo.	45
Figura 7-5 Orden de los cuadrantes	45
Figura 7-6 Histogramas de las tensiones a 10 cm del ensayo 7.3	46
Figura 7-7 Datos recogidos en el ensayo.	47
Figura 7-8 Histogramas de las tensiones a 13 cm del ensayo 7.3	48
Figura 7-9 Datos recogidos en el ensayo.	48
Figura 7-10 Histogramas de las tensiones a 16 cm del ensayo 7.3	49
Figura 7-14 Datos recogidos en el ensayo.	50
Figura 7-15 Histogramas de las tensiones a 10 cm del ensayo 7.4	51
Figura 7-16 Datos recogidos en el ensayo.	51
Figura 7-17 Histogramas de las tensiones a 22 cm del ensayo 7.4	52
Figura 7-18 Histograma a 22 cm.	52
Figura 7-19 Datos recogidos en el ensayo.	53
Figura 7-20 Histograma del ensayo 7.5 a 10 cm	54
Figura 7-21 Gráfica de los datos recogidos en este ensayo.	54
Figura 7-22 Histograma de tensiones a 22 cm del ensayo 7.5	55
Figura 7-23 Histograma a 22cm.	56
Figura 7-24 Datos recogidos en el ensayo.	56
Figura 7-25 Rango de tensiones del ensayo 7.6 a 10 cm.	57
Figura 7-26 Gráfica de los datos recogidos en este ensayo.	58
Figura 7-27 Histograma de tensiones del ensayo 7.6 a 22 cm	59
Figura 7-28 Histograma del ensayo 7.6.	59
Figura 7-29 Datos recogidos en el ensayo.	60
Figura 7-30 Histograma de tensiones del ensayo 7.7 a 10 cm	61
Figura 7-31 Gráfica de los datos recogidos en este ensayo.	61
Figura 7-32 Histograma del ensayo 7.7 a 22 cm	62
Figura 7-33 Histograma del ensayo 7.7.	63

Notación

MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
cm	Centímetros
mV	Milivoltios
Ω	Ohmios

1 INTRODUCCIÓN

"El sol, nuestro astro rey, brinda su luz y energía de forma inagotable, alimentando los sueños de un futuro más brillante y sustentable."

- John F. Kennedy -

1.1 Introducción

Este proyecto reviste importancia debido a la creciente necesidad de comprender y caracterizar con precisión el comportamiento de los sensores solares en la determinación de los ángulos de incidencia solar.

En la actualidad, la medición precisa del ángulo de incidencia solar es fundamental para una amplia gama de aplicaciones. Por ejemplo, en el campo de la navegación espacial, conocer el ángulo de incidencia solar es esencial para orientar y posicionar correctamente las naves espaciales y satélites, así como para maximizar la eficiencia de los paneles solares utilizados en estas misiones.

Además, en áreas como la robótica, la agricultura de precisión y la energía renovable, la medición precisa de los ángulos de incidencia solar permite optimizar la orientación y el seguimiento de los sistemas y dispositivos que dependen de la radiación solar. Esto resulta fundamental para garantizar un rendimiento óptimo y mejorar la eficiencia de estas tecnologías.

En este TFG, se propone el uso del sensor Sun Sensor NANO-ISSX/c para obtener mediciones precisas de los ángulos de incidencia solar. Este sensor, conocido por su alta sensibilidad y precisión, permite caracterizar y estudiar el comportamiento de los ángulos de incidencia solar en diferentes situaciones y escenarios.

Los resultados obtenidos a partir de la medición y análisis de los ángulos de incidencia solar proporcionarán valiosa información para el diseño y la optimización de sistemas y dispositivos que dependen de la radiación solar. Asimismo, contribuirán al avance de áreas como la navegación espacial, la robótica y la energía renovable, donde la precisión en la medición del ángulo de incidencia solar es clave para el rendimiento y la eficiencia de los sistemas.

La caracterización de un sensor Sun Sensor NANO-ISSX/c para la medición del vector del ángulo de incidencia solar adquiere relevancia en diversos campos, desde la navegación espacial hasta la energía renovable. La precisión en la medición de estos ángulos es fundamental para optimizar el rendimiento de los sistemas y dispositivos dependientes de la radiación solar, impulsando así el avance y la eficiencia de estas tecnologías.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es diseñar e implementar un sistema electrónico para la medición del vector solar de un sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c utilizando un Arduino Uno, con el fin de estudiar el comportamiento del sensor y obtener el ángulo de las proyecciones del ángulo de incidencia solar en diferentes posiciones y escenarios.

1.3 Motivación

La motivación detrás de este proyecto radica en la creciente importancia de la energía solar y la necesidad de optimizar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de energía solar. La medición precisa del ángulo de incidencia solar es crucial para maximizar la captación de energía solar y mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y térmicos. Además, el estudio del comportamiento del sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c puede proporcionar información valiosa para el desarrollo de futuras aplicaciones en el campo de la energía solar y la navegación espacial.

2 ESTADO DEL ARTE

En el ámbito de la energía solar y otras disciplinas afines, la medición precisa de ángulos y vectores solares es esencial para maximizar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas solares. Para lograrlo, se utilizan sensores solares especializados que permiten determinar la posición relativa del sol con respecto a un punto de referencia. Estos sensores son fundamentales en aplicaciones como sistemas de seguimiento solar y optimización de la captación de energía solar.

Los sensores solares para la medición de ángulos o vectores se basan en principios de detección y calibración cuidadosamente diseñados. Su objetivo es captar la dirección y el ángulo de la radiación solar incidente, proporcionando información precisa sobre la posición del sol en relación con el punto de medición.

En esta revisión del estado del arte, exploraremos los diferentes tipos de sensores solares utilizados para la medición de ángulos o vectores solares. Nos centraremos en su funcionamiento, analizando los principios fundamentales que permiten obtener mediciones precisas y confiables.

Además, examinaremos las aplicaciones más relevantes de estos sensores, como la optimización de la orientación de paneles solares en sistemas fotovoltaicos, la generación de mapas de radiación solar y el seguimiento solar en aplicaciones de energía solar concentrada. También discutiremos los desafíos actuales y las tendencias futuras en el desarrollo de sensores solares para la medición de ángulos o vectores, incluyendo avances en la miniaturización, la eficiencia energética y la integración con sistemas de control inteligentes.

El objetivo es proporcionar una visión en profundidad de los sensores solares utilizados para la medición de ángulos o vectores solares, resaltando su importancia en la optimización y el rendimiento de los sistemas solares. A través de esta exploración, se espera obtener una comprensión sólida de estos sensores y su potencial para impulsar la eficiencia y el aprovechamiento óptimo de la energía solar.

2.1 Introducción a los sensores solares para la medición de ángulos o vectores.

Los sensores solares son dispositivos que permiten detectar y medir la posición del sol en relación con un punto de medición. Estos sensores pueden ser utilizados en sistemas de seguimiento solar, que mantienen los paneles solares y otros dispositivos orientados hacia el sol para maximizar la captación de energía [1]. Existen diferentes tipos de sensores solares, como los basados en celdas solares y fotodiodos [2]. Algunos sensores solares utilizan pares de elementos fotosensibles montados sobre el módulo y moviéndose solidariamente con él [1]. Otros diseños incluyen sensores de 3 ejes, que determinan la dirección del sol como un vector tridimensional, y sensores de 2 ejes [3].



Figura 2-1 Sistema de seguimiento solar de 2 ejes [1]

2.1.1 Importancia de la medición precisa de ángulos y vectores solares en sistemas solares.

La medición precisa de ángulos y vectores solares es crucial para optimizar la eficiencia de los sistemas solares, como los paneles fotovoltaicos y las centrales térmicas solares [4]. Al conocer la posición exacta del sol en cualquier momento y lugar, se pueden diseñar edificios con mejor iluminación natural, planificar los horarios de siembra de cultivos y mejorar la eficiencia de los paneles solares [4]. La radiación solar que llega a las placas solares colocadas perpendicularmente a la dirección de propagación de la radiación solar será siempre mayor que si esa misma placa se coloca con un ángulo diferente a ese óptimo perpendicular a la radiación [4].

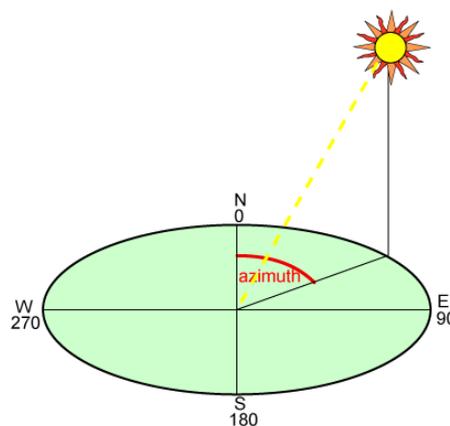


Figura 2-2 Ángulo Azimutal [4]

2.1.2 Papel de los sensores solares en la optimización y rendimiento de los sistemas solares.

Los sensores solares juegan un papel fundamental en la optimización y el rendimiento de los sistemas solares al permitir la detección y medición de la posición del sol en relación con un punto de medición [1]. Estos sensores también pueden utilizarse en sistemas de seguimiento solar, que mantienen los paneles solares y otros dispositivos orientados hacia el sol para maximizar la captación de energía [1]. Los sistemas de seguimiento solar pueden aumentar la energía total recibida en un día hasta en un 35% en comparación con un módulo estático [1].

Los sensores solares tienen múltiples aplicaciones en diversos sectores, como el aeroespacial, la defensa, la automoción y las energías renovables [5]. Por ejemplo, los sensores solares miniaturizados pueden utilizarse en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado de automóviles [5]. Además, los sensores solares pueden emplearse en el diseño de entornos gráficos para visualizar el estado de un sensor solar en aplicaciones espaciales [6].

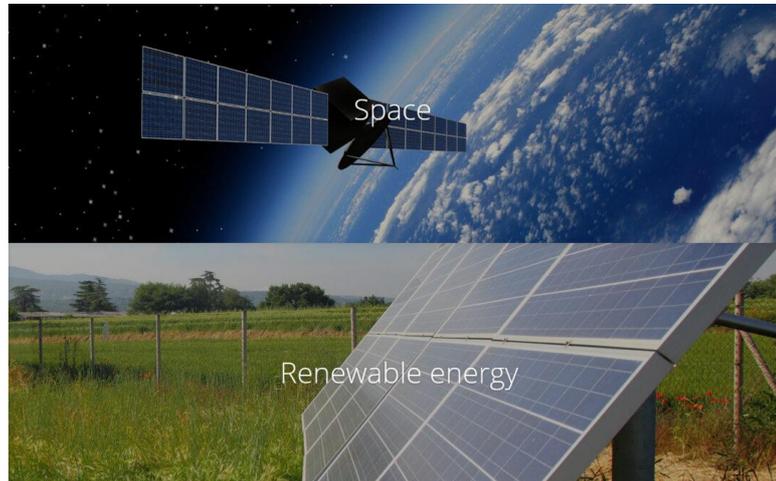


Figura 2-3 Diferentes usos de los sensores solares [5]

En resumen, los sensores solares son dispositivos esenciales para la medición precisa de ángulos y vectores solares, lo que permite optimizar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas solares. Estos sensores tienen aplicaciones en diversos sectores y pueden contribuir significativamente a la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad en diferentes ámbitos.

2.2 Principios de funcionamiento de los sensores solares para la medición de ángulos o vectores:

2.2.1 Métodos de detección y calibración utilizados en los sensores solares.

Existen diferentes tipos de sensores solares, como los basados en celdas solares y los basados en tecnologías ópticas. [2] [7] Los sensores de seguimiento solar, por ejemplo, pueden utilizar elementos fotosensibles montados en el módulo para detectar la posición del sol y ajustar la orientación del panel en consecuencia [1]. Estos sensores pueden estar constituidos por pares de elementos fotosensibles que se valen de la radiación solar directa para detectar la posición del sol [1].

En cuanto a la calibración de los sensores solares, se utilizan diferentes métodos para mejorar su precisión y eficiencia [8] [9]. Por ejemplo, el método de calibración de un piranómetro utiliza un pirheliómetro como instrumento patrón, el cual solo mide la radiación solar directa que llega sobre la superficie [9].



Figura 2-4 Piranómetro destapado (mide radiación global) [9]

2.2.2 Principales características y especificaciones a considerar en estos sensores.

Algunas de las características y especificaciones clave a considerar en los sensores solares incluyen su precisión, eficiencia energética, robustez, resistencia al clima y facilidad de mantenimiento [10].

La precisión de los sensores solares es fundamental para garantizar una correcta detección y seguimiento del sol, lo que a su vez permite una mayor eficiencia en la captación de energía solar [9]. La eficiencia energética de los sensores también es importante, ya que un sensor más eficiente puede aprovechar mejor la energía solar y reducir el consumo de energía [11] [7].

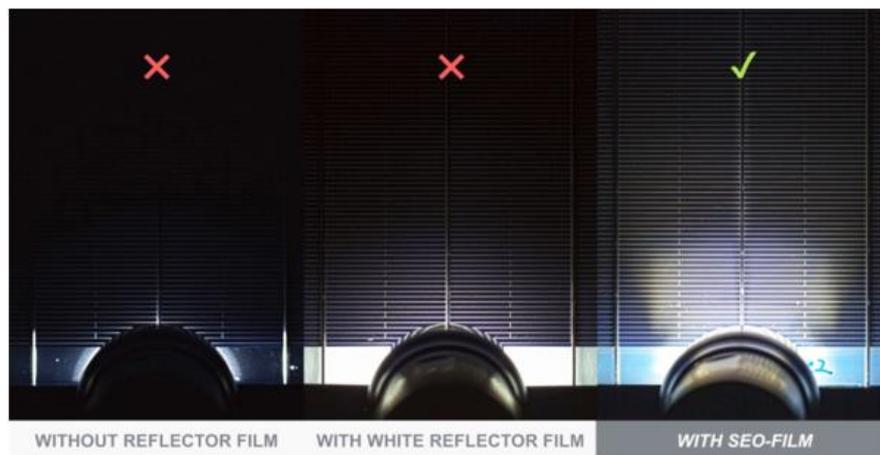


Figura 2-5 Tecnología SEO se concentra en controlar y redirigir más luz solar al interior de las celdas solares [11]

La robustez y resistencia al clima de los sensores solares son aspectos clave a tener en cuenta, ya que estos dispositivos están expuestos a condiciones ambientales extremas y deben ser capaces de soportar factores como la lluvia, el viento y la radiación solar [11]. Por último, la facilidad de mantenimiento es un aspecto importante a considerar, ya que un sensor fácil de mantener puede reducir los costos y el tiempo dedicado al mantenimiento.

En resumen, los sensores solares para la medición de ángulos o vectores utilizan diferentes métodos de detección y calibración para mejorar su precisión y eficiencia. Algunas de las características y especificaciones clave a considerar en estos sensores incluyen su precisión, eficiencia energética, robustez, resistencia al clima y facilidad de mantenimiento. Estos aspectos son fundamentales para garantizar un correcto funcionamiento y aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones como el seguimiento solar y la medición de la posición del sol.

2.3 Tipos de sensores solares para la medición de ángulos o vectores:

2.3.1 Sensores de posición solar: Tecnologías y métodos utilizados para determinar la posición del sol en relación con un punto de medición.

Los sensores de posición solar utilizan tecnologías y métodos para determinar la posición del sol en relación con un punto de medición. Estos sensores pueden basarse en celdas solares, tecnologías ópticas o elementos fotosensibles [12]. Un ejemplo de sensor solar es el desarrollado por la Universidad de Cádiz, que consiste en una matriz de píxeles que miden la intensidad luminosa y utiliza el protocolo de comunicación Address Event Representation para enviar eventos de forma asíncrona [13].

Las celdas solares Graetzel, también conocidas como células solares sensibilizadas por colorante, son un tipo de celda solar que utiliza un semiconductor formado entre un ánodo fotosensible y un electrolito para convertir la energía lumínica en energía eléctrica [14]. Estas celdas solares de bajo costo pertenecen a las células solares de películas finas y son una opción atractiva para la medición de la posición del sol.



Figura 2-6 Células de pigmento fotosensible o células Grätzel. [14]

2.3.2 Sensores de seguimiento solar: Sistemas y técnicas empleadas para mantener paneles solares u otros dispositivos orientados hacia el sol.

Los sensores de seguimiento solar emplean sistemas y técnicas para mantener paneles solares y otros dispositivos orientados hacia el sol, maximizando así la captación de energía [12]. Estos sensores pueden utilizar elementos fotosensibles montados en el módulo para detectar la posición del sol y ajustar la orientación del panel en consecuencia [15].

Pepperl+Fuchs ofrece tecnología de sensores para sistemas de seguimiento de eje único y de eje doble, como sensores de inclinación y encoders, que garantizan una alineación óptima de los módulos fotovoltaicos y maximizan el rendimiento solar [16]. El sensor de inclinación F199 de Pepperl+Fuchs es una solución idónea para monitorizar el ángulo de inclinación de los sistemas de seguimiento de eje sencillo y doble, permitiendo una alineación exacta de los módulos fotovoltaicos y un aprovechamiento eficiente de la radiación solar [16].

En un prototipo de seguidor de luz solar, se utilizan sensores fotoresistivos en base a cuatro cuadrantes para detectar la mayor intensidad de luz solar y ajustar la posición del panel solar en consecuencia [15]. Estos sistemas de control de seguimiento solar pueden adaptarse a diferentes tipos de seguidores solares, tanto para producción de energía fotovoltaica convencional como para fotovoltaica de concentración y termosolar [16].



Figura 2-7 Sensor de inclinación F199 de Pepperl+Fuchs [16]

En resumen, los sensores solares para la medición de ángulos o vectores se dividen en sensores de posición solar y sensores de seguimiento solar. Estos sensores utilizan diversas tecnologías y métodos, como celdas solares, tecnologías ópticas, elementos fotosensibles y sensores de inclinación, para determinar la posición del sol y mantener los paneles solares orientados hacia el sol, maximizando así la captación de energía.

2.4 Aplicaciones de los sensores solares para la medición de ángulos o vectores:

2.4.1 Optimización de la orientación de paneles solares en sistemas fotovoltaicos.

Los sensores solares permiten ajustar la orientación de los paneles solares en sistemas fotovoltaicos para maximizar la captación de energía. La orientación idónea para dirigir los paneles solares es hacia el sur (ángulo azimutal de 180°), lo que permite recibir la máxima irradiación solar posible durante el día y, por tanto, optimizar el rendimiento del sistema [17]. Además, es importante verificar que no haya sombras sobre el sistema fotovoltaico para evitar pérdidas de eficiencia [17]. El uso de seguidores solares puede aumentar la producción de electricidad en alrededor de un tercio, y algunos reclaman hasta en un 40% en algunas regiones, en comparación con los módulos en un ángulo fijo [18]. Estos seguidores ajustan la dirección hacia la que se enfrenta un panel solar según la posición del Sol en el cielo, manteniendo el panel perpendicular al Sol y absorbiendo más energía [19].



Figura 2-8 Rastreador solar fotovoltaico [19]

2.4.2 Generación de mapas de radiación solar para evaluaciones de sitio y diseño de sistemas solares.

Los sensores de radiación solar, como los piranómetros, pueden utilizarse para medir la radiación solar incidente y generar mapas de radiación solar para evaluar sitios y diseñar sistemas solares [20]. Estos mapas pueden obtenerse a partir de bases de datos de radiación solar y ayudan a determinar el recurso solar disponible en el lugar donde se va a realizar la instalación [21]. La evaluación del recurso solar es fundamental para optimizar el rendimiento de un sistema fotovoltaico, ya que permite elegir la ubicación y la orientación correctas [22].

2.4.3 Seguimiento solar en aplicaciones de energía solar concentrada.

En las centrales térmicas solares, como las centrales de concentradores solares, sistemas Fresnel o torres de energía solar, los sensores solares se emplean para registrar con precisión el ángulo y la posición del sol [23]. La tecnología de sensores, como encoders y sensores de inclinación de Pepperl+Fuchs, permite alinear los espejos con respecto a la posición del sol y verificar un aprovechamiento eficiente del calor solar [23]. Estos sistemas utilizan el calor del sol y están especialmente indicados para desiertos y entornos desérticos en los que la radiación solar es abundante [23]. Los sistemas de control ajustan la orientación de los colectores, como los heliostatos en sistemas Fresnel, y maximizan la captación de energía [23]. En aplicaciones de energía solar concentrada, la eficiencia de la captación de energía es crucial, y el uso de sensores solares permite optimizar el rendimiento de estos sistemas [18].



Figura 2-9 Sistemas Fresnel [23]

2.5 Desafíos y tendencias futuras en los sensores solares para la medición de ángulos o vectores

2.5.1 Miniaturización y mejora de la eficiencia energética de los sensores solares.

La miniaturización de los sensores solares permite su integración en una amplia variedad de aplicaciones, como sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado de coches [5]. Además, la mejora de la eficiencia energética en dispositivos optoelectrónicos, como LED y celdas solares, se está investigando mediante el uso de monocapas de calcogenuros [24]. Estas tendencias permitirán una mayor integración en sistemas solares y una mayor precisión en las mediciones, al tiempo que reducirán los costes de los dispositivos y motivarán a las empresas a invertir en energía solar [5].

2.5.2 Integración de sensores con sistemas de control inteligentes.

La integración de sensores solares con sistemas de control inteligentes, como el Internet de las Cosas (IoT), permite una mayor automatización y optimización de los sistemas solares [25]. Un ejemplo de esto es el sistema

de control inteligente MeshControl, que monitoriza y regula la generación térmica y/o eléctrica de instalaciones solares en función de los perfiles de demanda y requerimientos del usuario [25]. La integración de este control en una instalación híbrida ha producido un aumento del 11% en la generación de energía en un caso tipo planteado, y un aumento del 66% al comparar con los sistemas solares tradicionales [25].

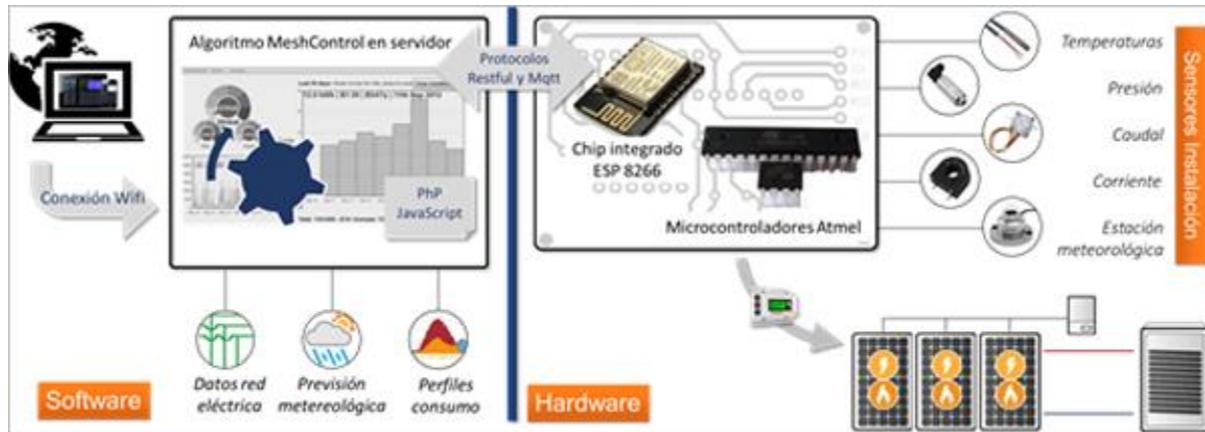


Figura 2-10 Descripción de la arquitectura que conforma el sistema MeshControl. [25]

Además, los sistemas de control inteligente de iluminación solar, como Quantum, pueden administrar miles de luces, persianas y sensores inteligentes en lugares de trabajo, universidades y hospitales de todo el mundo, ofreciendo precisión en cada dispositivo y personalización avanzada [26].

2.5.3 Avances en la precisión y confiabilidad de las mediciones de ángulos y vectores solares.

Los avances en la precisión y confiabilidad de las mediciones de ángulos y vectores solares permitirán una mayor optimización de los sistemas solares y una mejor adaptación a las condiciones ambientales y climáticas variables. La tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS) se utiliza en sensores solares para garantizar alta precisión y fiabilidad en aplicaciones aeroespaciales y terrestres [5].

La integración de la inteligencia artificial en el sector solar, como en el caso de TrinaTracker, permite maximizar la producción de energía y minimizar los costos de operación y mantenimiento (O&M) mediante modelos de autoaprendizaje y toma de decisiones propias[5]. Además, el sistema de control inteligente SuperTrack incluye piranómetros y sensores de nieve, cuyos datos se comparten entre las unidades de control, garantizando la continuidad del funcionamiento de los seguidores solares incluso si falla un sensor [27].

En resumen, las tendencias futuras en sensores solares para la medición de ángulos y vectores incluyen la miniaturización y mejora de la eficiencia energética, la integración con sistemas de control inteligentes y la aplicación de avances en precisión y confiabilidad en las mediciones. Estos desarrollos permitirán una mayor optimización de los sistemas solares y una mejor adaptación a las condiciones ambientales y climáticas variables, mejorando el rendimiento y la eficiencia de los sistemas solares en general.

3 METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo, abordaremos la metodología utilizada en nuestro estudio y realizaremos un análisis detallado de los componentes fundamentales de nuestro sistema. La metodología establece el enfoque y los pasos sistemáticos seguidos para obtener resultados confiables, mientras que el análisis se centrará en componentes como el sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c, Arduino Uno, teclado 4x4, pantalla LCD con I2C incorporado, resistencia de 10k ohm, protoboard y fuente de alimentación. A través de esta exploración exhaustiva, obtendremos una comprensión profunda de cómo estos componentes contribuyen al funcionamiento general de nuestro proyecto.

3.1 Metodología

La metodología del proyecto se llevará a cabo en las siguientes etapas:

1. Revisión bibliográfica y estudio del sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c, incluyendo sus características técnicas, principios de funcionamiento y aplicaciones.
2. Diseño e implementación del sistema de caracterización rápida utilizando un Arduino Uno, incluyendo la selección e integración de componentes adicionales como un teclado y una pantalla LCD.
3. Desarrollo de algoritmos y ecuaciones basadas en el datasheet del Sun Sensor NANO-ISSX/c para calcular el ángulo de las proyecciones del ángulo de incidencia solar a partir de las tensiones de entrada del sensor.
4. Realización de pruebas experimentales para estudiar el comportamiento del sensor en diferentes posiciones y escenarios, analizando los resultados obtenidos y comparándolos con los valores teóricos esperados.
5. Evaluación de la precisión, sensibilidad y eficiencia del sistema de caracterización rápida desarrollado, identificando posibles mejoras y aplicaciones futuras.
6. Documentación y presentación de los resultados obtenidos en el TFG, incluyendo el análisis de los datos experimentales y las conclusiones derivadas del estudio del sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c.

3.2 Descripción del sistema electrónico

Con el objetivo de comprender de forma sencilla el funcionamiento completo de nuestro sistema, utilizaremos el siguiente diagrama que se presentarán a continuación para su explicación.

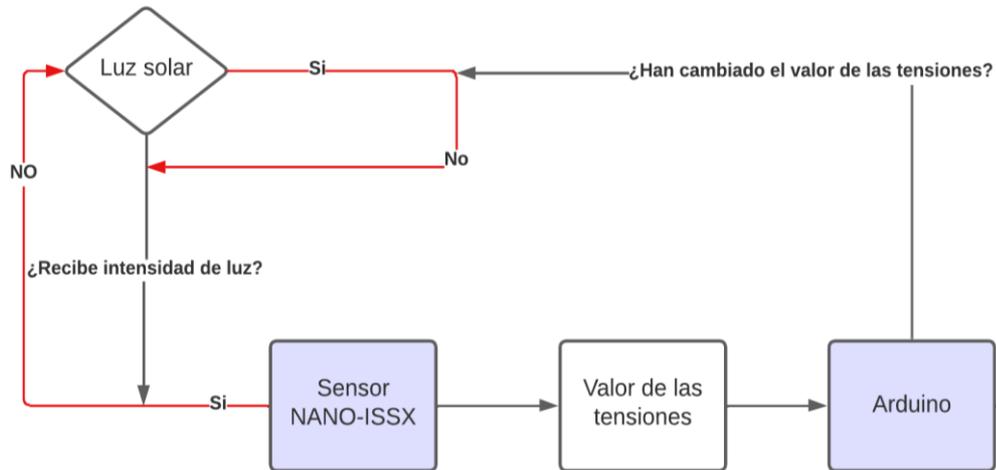


Figura 3-1 Diagrama de Bloques de nuestro sistema 1

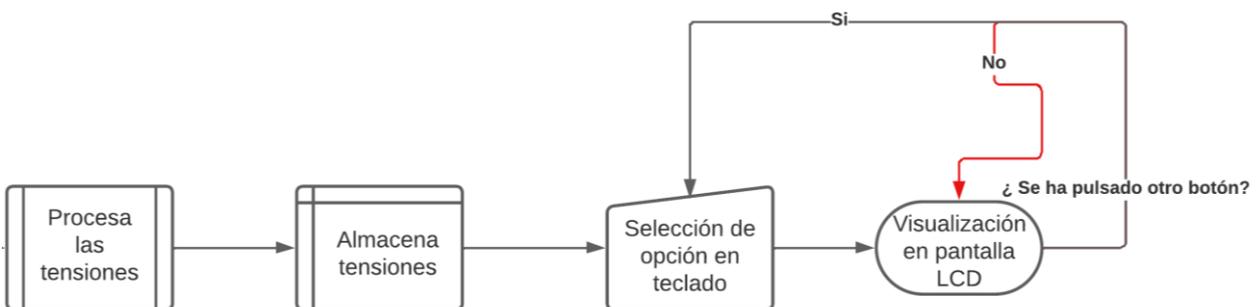


Figura 3-2 Diagrama de Bloques de nuestro sistema

¿Cómo incide la luz en nuestro sensor y como la procesa?

La luz incide en nuestro sensor a través de su superficie receptora, la cual está diseñada para captar la radiación luminosa. Esta superficie suele estar compuesta por una matriz de fotodiodos sensibles a la luz. Los fotodiodos son dispositivos semiconductores que generan una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la luz que incide sobre ellos.

Cuando la luz del exterior llega al sensor, cada fotodiodo reacciona de manera diferente según el ángulo de incidencia solar y la intensidad de la luz. Esto se debe a que la luz puede llegar directamente o reflejarse antes de alcanzar el sensor, lo que produce variaciones en la cantidad de luz que llega a cada fotodiodo.

Cada fotodiodo genera una tensión eléctrica correspondiente a la corriente generada por la luz incidente. Estas tensiones se pueden medir y utilizar para determinar el ángulo de incidencia solar. Para lograr esto, es necesario contar con una calibración específica para el sensor, la cual suele estar proporcionada en el datasheet o manual de usuario del mismo.

El datasheet del sensor proporciona las ecuaciones y los parámetros necesarios para convertir las tensiones de los fotodiodos en una medida precisa del ángulo de incidencia solar. Estas ecuaciones se basan en las características del sensor y en las propiedades de la luz, permitiendo calcular el ángulo con una precisión determinada.

Una vez que las señales provenientes de los fotodiodos son captadas por el sensor y procesadas, es común utilizar un microcontrolador como Arduino para realizar diversas tareas, como el almacenamiento de los datos o su visualización en una pantalla LCD.

En este contexto, se puede emplear un teclado conectado al Arduino para permitir al usuario interactuar con el sistema y seleccionar la información que desea visualizar. Mediante el teclado, se pueden programar diferentes opciones, como la elección de la tensión específica que se desea mostrar en la pantalla LCD.

Cuando el usuario pulsa un botón en el teclado, se genera una señal eléctrica que es detectada por el Arduino. A través del código programado en el Arduino, se realiza la correspondiente acción en función de la tecla pulsada. Por ejemplo, si se desea ver una tensión en particular, el usuario puede seleccionar una opción en el teclado que active el código correspondiente en el Arduino para mostrar esa tensión específica en la pantalla LCD.

La pantalla LCD conectada al Arduino muestra la información seleccionada de manera legible para el usuario. El Arduino se encarga de procesar y enviar los datos necesarios para actualizar la pantalla LCD, proporcionando una visualización clara y comprensible de la información requerida.

4 ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES

4.1 Sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c

El Sun Sensor NANO-ISSX/c es un sensor solar de dos ejes ortogonales desarrollado por Solar MEMS Technologies. Este sensor permite medir el vector de incidencia de los rayos solares proporcionando sus ángulos de proyección en ejes de referencia ortogonales mediante un simple cálculo. [28]

El sensor solar NANO-ISSX/c tiene diversas aplicaciones, como en energías renovables, sistemas de control de actitud para vehículos, seguimiento solar y sistemas domóticos. Su diseño compacto, fácil integración y bajo consumo de energía lo convierten en una herramienta adecuada para estas aplicaciones.

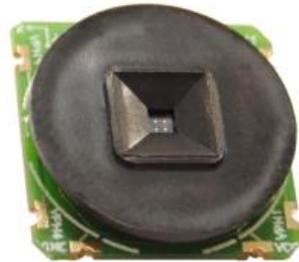


Figura 4-1 Sun Sensor NANO-ISSX/c [28]

El modo de funcionamiento del Sun Sensor NANO-ISSX/c se basa en el uso de un fotodetector de cuadrante, que consiste en cuatro fotodiodos adaptados depositados en un chip único. La luz solar se guía hacia el detector a través de una ventana ubicada sobre el sensor. Dependiendo del ángulo de incidencia, la luz solar induce corrientes fotovoltaicas en los cuatro cuadrantes del detector. Estas corrientes eléctricas dependen de forma lineal de la cantidad de luz capturada [28].

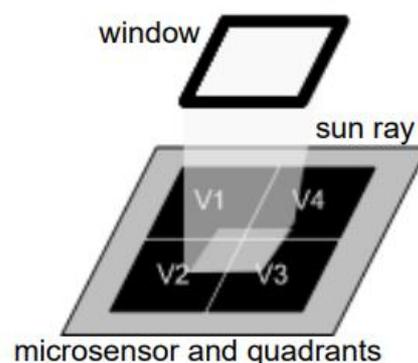


Figura 4-2 Microsensor del NANO-ISSX [28]

Cuando la luz solar incide simétricamente en el eje central del fotodetector de cuadrante, las cuatro corrientes de fotodiodo son iguales. Sin embargo, si la luz se desplaza hacia un cuadrante específico, la corriente en ese cuadrante cambiará, permitiendo determinar la posición y el ángulo de incidencia de los rayos solares [28].

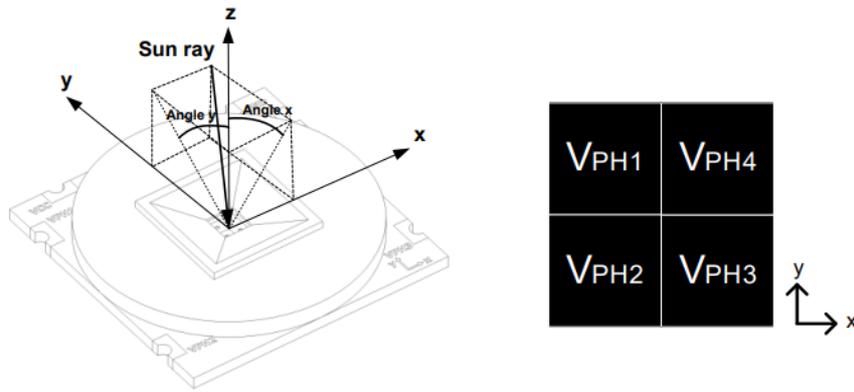


Figura 4-3 Cálculo de ángulos [28]

El Sun Sensor NANO-ISSX/c utiliza las tensiones de entrada de los cuatro fotodiodos (V_{PH1} , V_{PH2} , V_{PH3} y V_{PH4}) para calcular los ángulos de proyección del ángulo de incidencia solar en dos ejes ortogonales (X e Y) mediante las siguientes ecuaciones [28]:

- Para la proyección del ángulo de incidencia sobre el plano que recogen a los ejes X y Z:

$$X1 = V_{PH3} + V_{PH4}$$

$$X2 = V_{PH1} + V_{PH2}$$

$$FX = \frac{(X2 - X1)}{(X2 + X1)}$$

$$ANGLE X = \arctan(C * FX)$$

- Para la proyección del ángulo de incidencia sobre el plano que recogen a los ejes Y y Z:

$$Y1 = V_{PH1} + V_{PH4}$$

$$Y2 = V_{PH2} + V_{PH3}$$

$$FY = \frac{(Y2 - Y1)}{(Y2 + Y1)}$$

$$ANGLE Y = \arctan(C * FY)$$

Donde C es un coeficiente proporcionado por el fabricante según el modelo concreto del sensor, en este caso, $C = 1.889$.

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

Tabla 4-1 Valores de los parámetros de C acuerdo a el tipo del sensor NANO-ISSX

4.2 Arduino Uno

Arduino Uno es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328P [29]. Esta placa cuenta con 14 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 6 pueden utilizarse como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un conector ICSP y un botón de reinicio [29].

La facilidad de uso, compatibilidad con una amplia gama de sensores y componentes, y su amplia comunidad de soporte hacen que Arduino Uno sea ideal para proyectos de prototipado y desarrollo [30]. Además, su bajo costo y disponibilidad lo convierten en una opción popular en diversas aplicaciones.

Arduino Uno se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, como automatización industrial, domótica, robótica y electrónica [31]. Su versatilidad y facilidad de uso lo convierten en una excelente opción para proyectos que requieren la integración y comunicación con sensores solares, teclados y pantallas LCD.

Los pines digitales y analógicos de Arduino Uno permiten recibir y enviar señales a otros dispositivos y sensores [30]. Las entradas analógicas del modelo Uno corresponden a los pines de A0 a A5, mientras que las entradas digitales son las mismas que las salidas digitales, es decir, los pines que van del 1 al 13 [32].



Figura 4-4 Conexión cables de Arduino [32]

El oscilador de cristal de 16 MHz proporciona la frecuencia de trabajo para el microcontrolador ATmega328P. Este componente es esencial para el funcionamiento de la placa y garantiza la precisión en la temporización de las operaciones.

En resumen, Arduino Uno es una excelente opción para proyectos que requieren facilidad de uso, compatibilidad con diversos sensores y componentes, y una amplia comunidad de soporte. Su versatilidad y bajo costo lo convierten en una herramienta popular en aplicaciones de automatización industrial, domótica, robótica y electrónica.

4.3 Teclado 4x4

El teclado matricial 4x4 es un dispositivo que agrupa 16 pulsadores en una matriz de 4 filas y 4 columnas, permitiendo controlarlos utilizando un número menor de conductores que si se usaran de forma individual [33]. Este teclado se utilizará para diseñar un menú con varias opciones, permitiendo al usuario seleccionar y visualizar diferentes tensiones y ángulos de proyección del ángulo de incidencia solar. La implementación de este teclado en el proyecto facilitará la interacción del usuario con el sistema y permitirá un control más preciso de las mediciones y visualizaciones.



Figura 4-5 Teclado utilizado.

4.3.1 Funcionamiento

El funcionamiento del teclado matricial se basa en la disposición de pulsadores en filas y columnas, formando una matriz [34]. Cada tecla es un pulsador conectado a una fila y a una columna. Cuando se pulsa una de las teclas, se cierra una conexión única entre una fila y una columna. Para leer el estado de las teclas, se aplica tensión en las filas de forma secuencial y luego se leen las columnas para ver cuál de ellas tiene un estado HIGH [35].

4.3.2 Aplicaciones

Los teclados matriciales se utilizan comúnmente en proyectos de electrónica y robótica, como cambiar el modo de funcionamiento de un montaje, solicitar una contraseña, controlar un brazo robótico o un vehículo, o proporcionar instrucciones a un robot [34]. Algunas aplicaciones específicas incluyen:

1. Sistemas de seguridad: El teclado matricial puede ser utilizado para ingresar códigos de acceso en sistemas de seguridad, como cerraduras electrónicas [36].
2. Selección de menús: En proyectos que requieren navegación por menús y selección de opciones, el teclado matricial puede ser utilizado para facilitar la interacción del usuario.
3. Control de operaciones: El teclado matricial puede ser utilizado en sistemas de control de operaciones, como en la programación de temporizadores [37].
4. Mandos a distancia: En proyectos que requieren control remoto, el teclado matricial puede ser utilizado para enviar comandos a dispositivos a distancia.

4.4 Pantalla LCD con I2C incorporado

La pantalla LCD con I2C incorporado es una solución eficiente para conectar y comunicarse con dispositivos como Arduino Uno. La interfaz I2C (Inter-Integrated Circuit) es un protocolo de comunicación que permite la conexión de múltiples dispositivos utilizando solo dos cables de transmisión de información y dos cables de alimentación. Esto simplifica el montaje y la programación del sistema, ya que se requieren menos pines para conectar la pantalla al Arduino [38].



Figura 4-6 Pantalla LCD 16x2 con I2C [39]

Es útil en una amplia variedad de aplicaciones, como monitoreo de sensores, sistemas de control, interfaces de usuario y más. Su principal ventaja es la simplificación de la conexión y la comunicación entre la pantalla y el microcontrolador, lo que permite un montaje más sencillo y una programación más fácil.

Una pantalla LCD típica con I2C incorporado consta de un LCD alfanumérico basado en HD44780 y un adaptador I2C [39]. La pantalla LCD1602, por ejemplo, tiene una resolución de 16x2, lo que significa que puede mostrar 32 caracteres ASCII en dos filas.

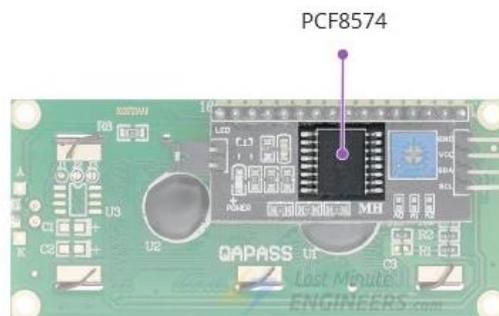


Figura 4-7 Microcontrolador del I2C [39]

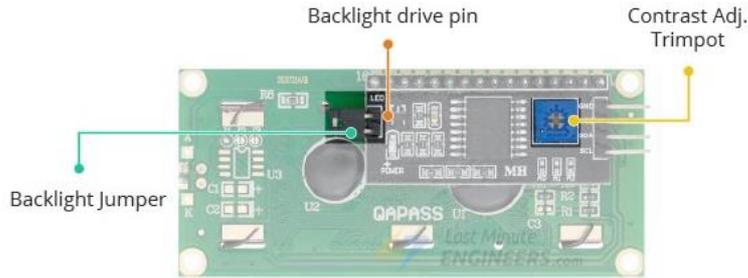


Figura 4-8 Partes relevantes del I2C [39]

Para conectar la pantalla LCD con I2C incorporado al Arduino Uno, se deben conectar los siguientes pines[1][5]:

- SDA (datos o información)
- SCL (señal de reloj)
- VCC (alimentación 5V)
- GND

El protocolo I2C es un protocolo de comunicación síncrono, multi-esclavo y multi-maestro que utiliza solo dos cables para la transmisión de datos (SDA) y reloj (SCL). Esto permite una conexión más sencilla y menos cables en comparación con las pantallas LCD tradicionales que utilizan un bus paralelo. Además, el protocolo I2C permite compartir los mismos pines de comunicación con otros dispositivos I2C, lo que facilita la expansión y la conexión de múltiples dispositivos en un solo bus [40].

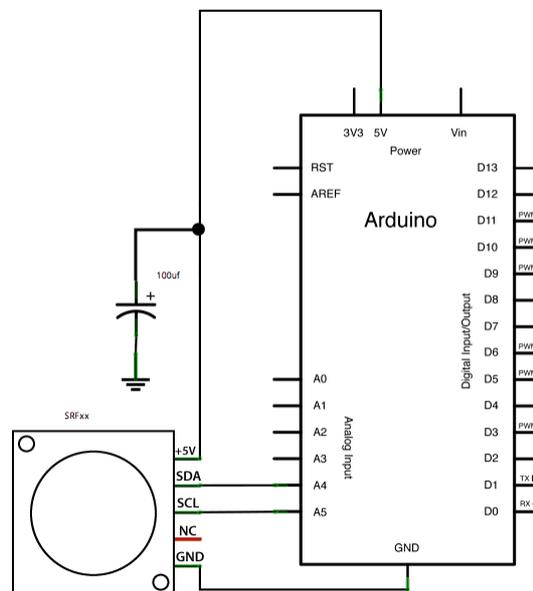


Figura 4-9 Schematic I2C [40]

La comunicación entre el Arduino y la pantalla LCD se realiza a través de los pines de comunicación I2C. Para facilitar la programación, se pueden utilizar librerías externas como `<Wire.h>` y `<LiquidCrystal_I2C.h>` [41].

La pantalla LCD permitirá visualizar las tensiones y ángulos de proyección del ángulo de incidencia solar en tiempo real, proporcionando una retroalimentación visual útil para el usuario. El ángulo de incidencia solar es el ángulo entre la radiación directa y la normal a la superficie considerada. Conocer este ángulo es importante para optimizar el rendimiento de sistemas solares, como paneles fotovoltaicos.

En resumen, la pantalla LCD con I2C incorporado es una solución eficiente y fácil de usar para conectar y comunicarse con dispositivos como Arduino Uno. La interfaz I2C simplifica el montaje y la programación del sistema, y la pantalla LCD permite visualizar información relevante en tiempo real.

4.5 Resistencia de 10k Ω

La resistencia de 10k Ω es un componente electrónico comúnmente utilizado en circuitos y prototipos. Estas resistencias tienen una tolerancia del 5% y una potencia de 1/4 de vatio [42]. Uno de los usos más habituales de las resistencias de 10k Ω es en configuraciones de "pulldown" en circuitos con sensores [43].



Figura 4-10 Resistencia de 10k Ω [42]

4.5.1 ¿Qué es un "pulldown"?

Un "pulldown" es una técnica utilizada en circuitos electrónicos para mantener un nivel de tensión estable en un pin de entrada cuando no hay señal presente. Esto se logra conectando una resistencia entre el pin de entrada y tierra (GND). La resistencia "tira hacia abajo" la tensión en el pin de entrada, evitando que flote y cause lecturas erróneas o inestables [43].

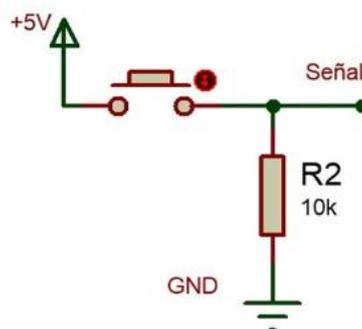


Figura 4-11 Esquemático del pull-down

4.5.2 ¿Por qué se utiliza una resistencia de 10k Ω en un "pulldown"?

La resistencia de 10k Ω es un valor comúnmente utilizado en configuraciones de "pulldown" debido a su capacidad para mantener la tensión de entrada del sensor estable y precisa. Al utilizar una resistencia de 10k Ω

en un "pulldown", se garantiza que las lecturas del sensor sean confiables y precisas, lo que mejora la calidad de las mediciones y el rendimiento del sistema [43].

4.5.3 Aplicaciones de la resistencia de 10kΩ en "pulldown"

Las resistencias de 10kΩ se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluidos circuitos con sensores resistivos como fotoresistores (sensores de luz) y resistores sensibles a la fuerza (FSR). También se pueden utilizar en circuitos con microcontroladores, como Arduino, para garantizar que los pines de entrada no actúen como antenas y generen lecturas erróneas o inestables [43].

En resumen, la resistencia de 10kΩ es un componente clave en configuraciones de "pulldown" para mantener la tensión de entrada del sensor estable y precisa. Su uso en circuitos con sensores y microcontroladores mejora la calidad de las mediciones y el rendimiento del sistema.

4.6 Protoboard

Una protoboard, también conocida como placa de pruebas o breadboard, es un tablero con orificios conectados eléctricamente entre sí de manera interna, siguiendo patrones de líneas. Se utilizan para insertar componentes electrónicos y cables, facilitando el armado, prototipado y prueba de circuitos electrónicos sin necesidad de soldaduras permanentes. [44]

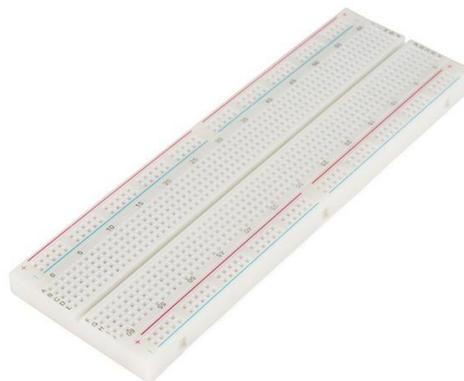


Figura 4-12 Protoboard utilizada

La protoboard está compuesta por bloques de plástico perforados y láminas delgadas de una aleación de cobre, estaño y fósforo que unen las perforaciones, creando líneas de conducción paralelas.

4.7 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación para este proyecto será la del propio ordenador, a través del cable USB conectado al Arduino Uno. No se utilizarán fuentes de alimentación independientes, y el Arduino funcionará con una alimentación de 5V [45]. Esta configuración simplifica el montaje y reduce la necesidad de componentes adicionales.

4.7.1 Alimentación a través de USB

La forma más sencilla de alimentar el Arduino Uno es a través del puerto USB. Cuando se trabaja con Arduino, normalmente se alimenta a través del cable USB que va al ordenador [46]. Este método de alimentación tiene la ventaja de ser seguro y fácil de implementar, ya que no podemos cometer errores de polaridad ni de voltaje cuando usamos USB para alimentar. Además, el puerto USB cuenta con un fusible PPTC que limita la corriente que el Arduino (y sus accesorios) pueden demandar del puerto USB, quedando la corriente máxima limitada a

unos 500 mA [46].

4.7.2 Ventajas de la alimentación por USB

Alimentar el Arduino Uno a través del cable USB ofrece varias ventajas [46]:

1. Simplifica el montaje: no se requieren componentes adicionales, como fuentes de alimentación externas o baterías.
2. Reduce costos: no es necesario adquirir fuentes de alimentación adicionales.
3. Seguridad: el uso de USB para alimentar el Arduino evita errores de polaridad y voltaje.
4. Limitación de corriente: el fusible PPTC protege el Arduino y sus accesorios al limitar la corriente máxima a 500 mA.

4.7.3 Consideraciones al usar la alimentación por USB

Aunque la alimentación por USB es conveniente y segura, hay algunas consideraciones a tener en cuenta:

1. Corriente máxima limitada: el puerto USB solo puede suministrar hasta 500 mA, lo que puede ser insuficiente para proyectos con múltiples sensores y actuadores [46].
2. Dependencia del ordenador: al alimentar el Arduino a través del cable USB, el proyecto dependerá de la conexión al ordenador para funcionar [45].

En resumen, la fuente de alimentación para este proyecto será la del propio ordenador, utilizando un cable USB conectado al Arduino Uno. Esta configuración es simple, segura y reduce la necesidad de componentes adicionales. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones de corriente y la dependencia del ordenador al utilizar este método de alimentación.

5 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA A NIVEL HARDWARE

En este apartado abordaremos el proceso detallado de montaje del proyecto a nivel hardware, así como la integración de los diferentes componentes entre sí.

En la era actual de avances tecnológicos y la creciente interconectividad de dispositivos, resulta fundamental comprender cómo diseñar y ensamblar un sistema que funcione de manera eficiente y coherente. La implementación exitosa de un proyecto requiere una cuidadosa planificación, selección de componentes adecuados y una integración efectiva para garantizar un rendimiento óptimo.

A lo largo de este apartado, exploraremos los pasos clave seguidos durante el proceso de montaje del proyecto a nivel hardware. Comenzaremos describiendo la selección de los componentes utilizados, considerando las necesidades y requisitos específicos del sistema. Analizaremos detalladamente cómo se han integrado los diferentes componentes para asegurar su funcionamiento armonioso y sin problemas.

Además, examinaremos las consideraciones técnicas y prácticas que se tuvieron en cuenta durante el montaje del sistema. Esto incluirá aspectos como la disposición física de los componentes, las conexiones eléctricas, la configuración de los dispositivos y cualquier ajuste necesario para optimizar el rendimiento del sistema.

A medida que avancemos, también destacaremos las posibles dificultades encontradas durante el proceso de montaje y cómo se resolvieron. El análisis de estos desafíos nos permitirá comprender la importancia de la planificación cuidadosa, la resolución de problemas y la adaptabilidad en el diseño e implementación de un sistema.

5.1 Diseño del esquemático

En el apartado anterior, vimos en detalle todos los componentes utilizados para el diseño y con ello se propone el siguiente esquemático:

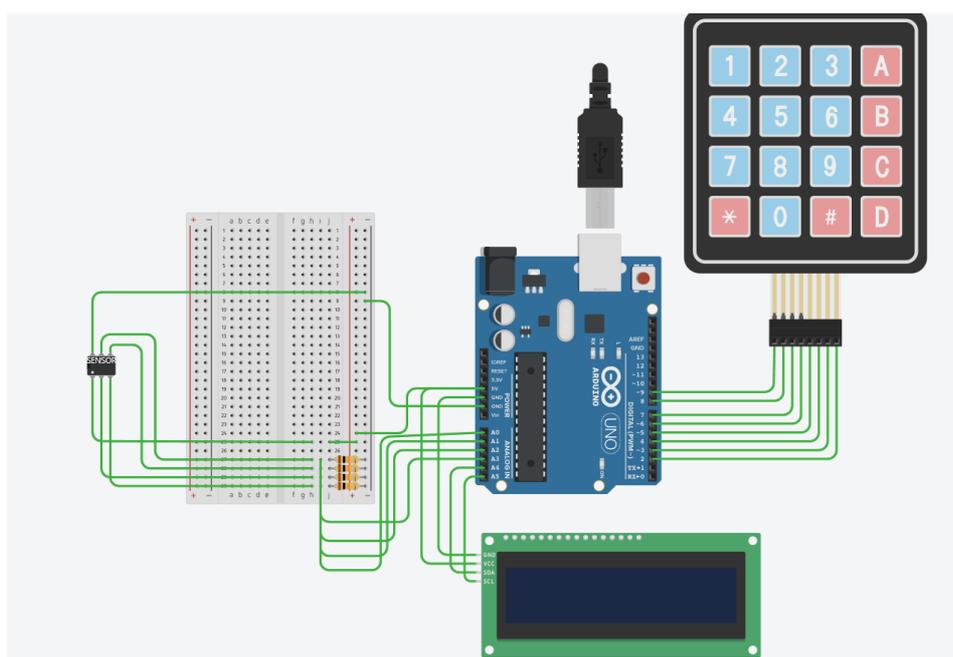


Figura 5-1 Esquema con los componentes.

Este esquema representa el diseño del sistema con los componentes físicos, así es fácil visualizar de forma sencilla todo el montaje. Sin embargo, a continuación se presenta la idea de una forma más clara:

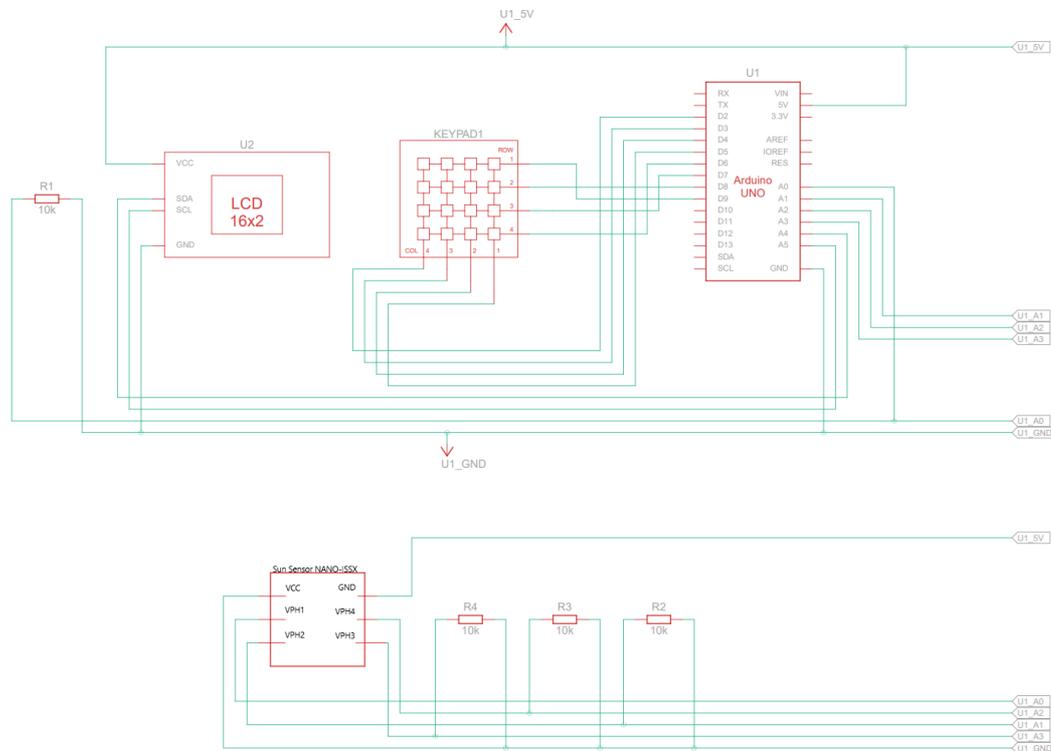


Figura 5-2 Esquemático simplificado.

De esta forma se nos hará más simple abordar como se han integrado los componentes entre sí, ya que solo tendremos que seguir nuestro diseño en 2D.

5.2 Integración de los componentes

Los componentes se integrarán entre sí siguiendo una cuidadosa planificación y un enfoque sistemático. Se establecerá una arquitectura de referencia que servirá como guía para determinar las conexiones eléctricas y la comunicación entre los componentes. A través de la configuración y programación adecuada, se logrará establecer una interacción fluida y coordinada entre ellos.

Se llevarán a cabo pruebas exhaustivas para verificar su correcto funcionamiento y se realizarán ajustes y optimizaciones adicionales para mejorar el rendimiento del sistema en su conjunto. Este enfoque integral de integración garantizará que los componentes trabajen de manera cohesionada y eficiente para cumplir con los objetivos del proyecto.

- **Teclado:**

Hemos integrado un teclado 4x4 en un Arduino utilizando una matriz de conexiones. Esto nos permitirá interactuar con el Arduino a través de las pulsaciones de botones del teclado. La configuración física del teclado y su conexión al Arduino se realiza de la siguiente manera:

- ❖ El teclado 4x4 consta de 4 filas y 4 columnas. Cada botón del teclado tiene asignado un carácter específico.
- ❖ Las filas del teclado están conectadas a los pines digitales del Arduino en orden descendente, es decir, la fila superior se conecta al pin digital 9, la siguiente fila al pin digital 8, y así sucesivamente hasta la fila inferior conectada al pin digital 6.
- ❖ Las columnas del teclado se conectan a los pines digitales del Arduino en orden descendente también,

comenzando desde la columna más a la izquierda conectada al pin digital 5, seguida de la columna siguiente al pin digital 4, y así sucesivamente hasta la columna más a la derecha conectada al pin digital 2.

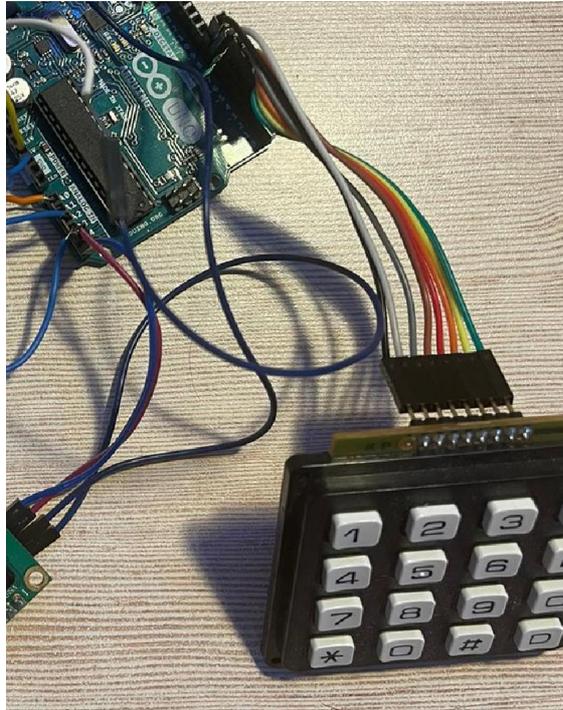


Figura 5-3 Implementación del teclado 4x4

Esta configuración de conexión nos permite leer las pulsaciones del teclado. Cada vez que se presiona un botón, se establece una conexión entre una fila y una columna específica. Mediante la identificación de la fila y la columna activadas, podemos determinar qué botón se ha presionado y qué carácter le corresponde según la matriz predefinida.

Al utilizar este enfoque de conexión, seremos capaces de recibir las entradas del teclado en tiempo real y realizar las acciones correspondientes según el botón presionado.

Esta integración física del teclado 4x4 con el Arduino nos permitirá implementar diversas funcionalidades y desarrollar nuestro proyecto de TFG de acuerdo a los requisitos específicos.

- **Pantalla LCD con I2C**

Hemos integrado una pantalla LCD con I2C incorporado en un Arduino para poder mostrar información visual de manera conveniente. La pantalla LCD tiene el modelo "1602A" impreso en la parte posterior.

La conexión física entre la pantalla LCD y el Arduino se realiza utilizando el protocolo I2C, lo que simplifica la cantidad de cables necesarios para la comunicación. A continuación, se detallan los pasos para realizar esta conexión:

Conexión de los pines I2C:

- ❖ El pin SDA (Serial Data) de la pantalla LCD se conecta al pin A4 del Arduino.
- ❖ El pin SCL (Serial Clock) de la pantalla LCD se conecta al pin A5 del Arduino.
- ❖ El pin VCC de la pantalla LCD se conecta al pin VCC del Arduino.
- ❖ El pin GND de la pantalla LCD se conecta al pin GND del Arduino.

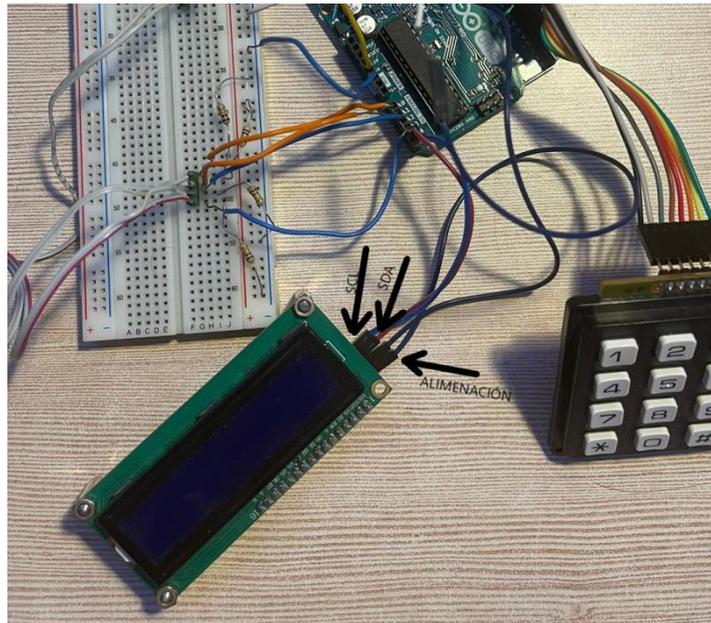


Figura 5-4 Conexión de la pantalla LCD con I2C al Arduino

Al realizar estas conexiones, se establece una comunicación bidireccional entre el Arduino y la pantalla LCD utilizando el protocolo I2C.

Este enfoque de conexión permite controlar la pantalla LCD de manera eficiente y sencilla, ya que el Arduino se encarga de enviar comandos y datos a través de la línea I2C hacia la pantalla LCD. Estos comandos y datos son interpretados por la pantalla LCD para mostrar la información correspondiente en su pantalla.

Con esta integración física de la pantalla LCD con I2C incorporado, podemos mostrar información relevante de forma clara y legible, mejorando así la interacción con el usuario.

- **Sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c**

Hemos integrado el Sun Sensor NANO-ISSX/c en un Arduino para medir la radiación solar. El sensor cuenta con los siguientes pines de conexión: VCC, GND, VPH1, VPH2, VPH3 y VPH4.

La conexión física del sensor al Arduino se realiza de la siguiente manera:

Conexión de los pines de alimentación:

- ❖ El pin VCC del sensor se conecta a una entrada de alimentación de 5V del Arduino.
- ❖ El pin GND del sensor se conecta a una entrada de tierra (GND) del Arduino.

Estas conexiones proporcionan la alimentación necesaria para el funcionamiento del sensor.

Conexión de los pines de voltaje:

- ❖ El pin VPH1 del sensor se conecta al pin analógico A2 del Arduino.
- ❖ El pin VPH2 del sensor se conecta al pin analógico A3 del Arduino.
- ❖ El pin VPH3 del sensor se conecta al pin analógico A0 del Arduino.
- ❖ El pin VPH4 del sensor se conecta al pin analógico A1 del Arduino.

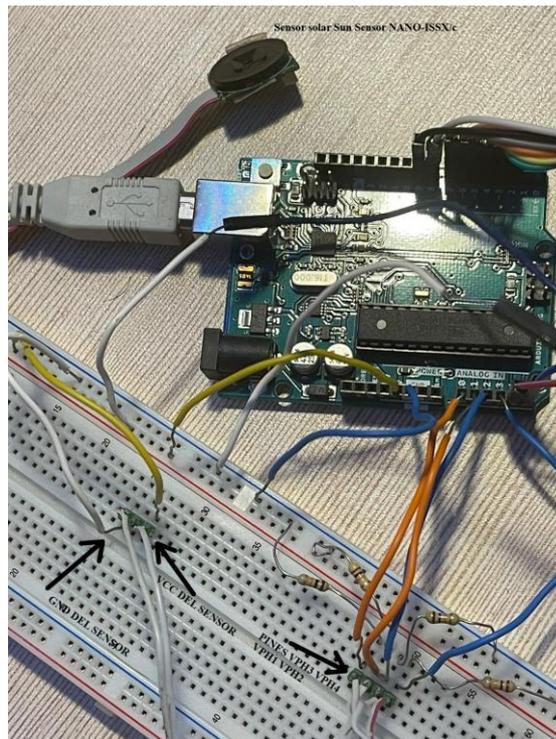


Figura 5-5 Implementación del sensor

Estas conexiones permiten que el Arduino pueda medir los valores de voltaje generados por el sensor en relación con la radiación solar.

Es importante destacar que cada uno de los pines VPH1, VPH2, VPH3 y VPH4 tienen una resistencia de $10\text{ k}\Omega$ conectada en el mismo nodo. Estas resistencias se utilizan en una técnica conocida como "pull-down", comentada en el apartado anterior, para evitar que los pines analógicos del Arduino actúen como antenas y mejoren la estabilidad de las mediciones.

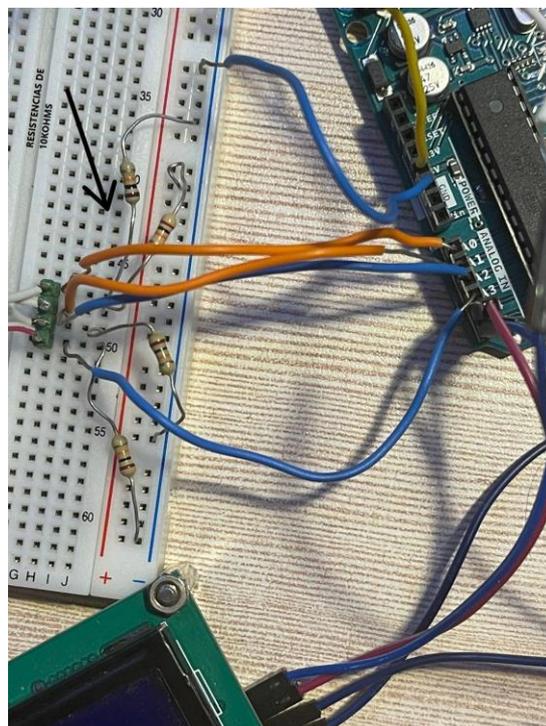


Figura 5-6 Resistencias pull-down de $10\text{ k}\Omega$

Al conectar los pines de alimentación y voltaje de acuerdo a las indicaciones mencionadas, el Arduino estará preparado para recibir las señales del sensor y realizar las mediciones necesarias.

6 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA A NIVEL SOFTWARE

El siguiente apartado tiene como objetivo principal abordar el diseño e implementación a nivel software del proyecto, profundizando en el código desarrollado y brindando una comprensión detallada de las diferentes partes que lo componen. Se analizarán las librerías utilizadas, las variables declaradas y se explicará el propósito y la finalidad de cada una de las secciones del código.

En primer lugar, se presentarán las librerías utilizadas en el proyecto, las cuales desempeñan un papel fundamental al proporcionar funciones y estructuras de datos predefinidas que simplifican el proceso de desarrollo. Se analizará la razón detrás de la elección de cada librería, destacando sus características clave y cómo contribuyen al funcionamiento del proyecto.

Posteriormente, se explorarán las variables declaradas en el código, revelando su utilidad y relación con el resto de los componentes. Se discutirá la importancia de una correcta gestión de las variables, incluyendo su tipo, alcance y valores asignados, para garantizar un rendimiento óptimo y una correcta interacción entre las diferentes secciones del código.

Además, se examinará en detalle cada parte del código implementado, desglosando su propósito y finalidad. Se explicarán los algoritmos utilizados, las estructuras de control y cualquier otra característica relevante que contribuya a la funcionalidad del proyecto. Asimismo, se destacarán las decisiones de diseño tomadas, justificando su pertinencia y cómo impactan en el desempeño y la eficiencia del software.

6.1 Librerías utilizadas

Las bibliotecas utilizadas en el código cumplen funciones específicas para facilitar la comunicación con dispositivos externos, como la pantalla LCD y el teclado matricial, así como proporcionar funciones matemáticas adicionales. Estas bibliotecas son fundamentales para el funcionamiento del sistema, ya que permiten la visualización de información en la pantalla, la detección de teclas presionadas y los cálculos matemáticos necesarios para obtener mediciones y ángulos, proporcionando una interfaz simplificada y facilitando el desarrollo de la aplicación. [47]

- **Wire.h:** Esta biblioteca permite la comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit) entre dispositivos. Se utiliza para establecer la comunicación entre el Arduino y la pantalla LCD basada en I2C.
- **LiquidCrystal_I2C.h:** Esta biblioteca se utiliza para controlar pantallas LCD basadas en el protocolo I2C. Proporciona funciones para inicializar la pantalla, imprimir texto en ella y controlar el retroiluminación.
 - ❖ **Características:** La biblioteca LiquidCrystal_I2C simplifica la interfaz y el control de las pantallas LCD, ya que utiliza la comunicación I2C para enviar los comandos y datos necesarios. Permite reducir el número de pines requeridos para conectar la pantalla al Arduino.
 - ❖ **Finalidad:** En el código, se utiliza para inicializar y controlar la pantalla LCD, mostrar mensajes de bienvenida y los valores medidos por los fotodiodos.
 - ❖ **Importancia:** Es esencial para el funcionamiento del sistema, ya que sin esta biblioteca no sería posible controlar la pantalla LCD basada en I2C.
- **Keypad.h:** Esta biblioteca se utiliza para leer entradas de un teclado matricial o keypad. Proporciona funciones para detectar las teclas presionadas y devolver su valor.
 - ❖ **Características:** La biblioteca Keypad simplifica la lectura de entradas de un teclado matricial, ya que se encarga de escanear las filas y columnas del teclado y detectar qué tecla ha sido presionada.
 - ❖ **Finalidad:** En el código, se utiliza para leer las teclas presionadas en un teclado 4x4.

- ❖ **Importancia:** Es importante para interactuar con el sistema a través del teclado y realizar diferentes acciones basadas en las teclas presionadas.
- **math.h:** Esta biblioteca proporciona funciones matemáticas adicionales, como funciones trigonométricas y de redondeo.
 - ❖ **Características:** La biblioteca math.h contiene una variedad de funciones matemáticas útiles, como `sin()`, `cos()`, `tan()`, `atan2()`, `sqrt()`, entre otras.
 - ❖ **Finalidad:** En el código, se utiliza para realizar cálculos matemáticos relacionados con la medición de las tensiones de los fotodiodos y el cálculo de ángulos.
 - ❖ **Importancia:** Es importante para realizar cálculos y conversiones matemáticas necesarias para obtener los valores de ángulo y otras mediciones a partir de los datos obtenidos de los fotodiodos.

Código 1.1 Librerías.

```
#include <Wire.h>
#include<LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h>
#include <math.h>
```

6.2 Variables iniciales

En esta parte del código se definen los pines utilizados para los fotodiodos del sensor solar, la inicialización de variables para controlar el tiempo, los pines de la pantalla LCD, la configuración del teclado 4x4 y la creación de objetos para controlar la pantalla LCD y el teclado.

Los pines de los fotodiodos del sensor solar se definen mediante las variables *VPH1_pin*, *VPH2_pin*, *VPH3_pin* y *VPH4_pin*, asignando a cada una el número de pin correspondiente. Estos pines se utilizan para leer las tensiones de los fotodiodos y realizar cálculos posteriores.

La variable *previousMillis* se utiliza para almacenar el tiempo anterior en milisegundos y la constante *interval* establece el intervalo de tiempo deseado. Estas variables se utilizan para realizar acciones en momentos específicos del programa, controlando la frecuencia de ejecución de ciertas operaciones.

Los pines de la pantalla LCD se definen mediante las constantes *SDA_pin* y *SCL_pin*, que especifican los pines de datos (SDA) y reloj (SCL) para la comunicación I2C con la pantalla.

Se define un teclado 4x4 mediante la matriz *keys*, donde se especifican los caracteres asociados a cada tecla. Los arreglos *rowPins* y *colPins* definen los pines a los que están conectadas las filas y columnas del teclado, respectivamente.

Se crea un objeto *lcd* de la clase *LiquidCrystal_I2C* para controlar la pantalla LCD. Se le pasa como parámetros la dirección de la pantalla (0x3F), el número de columnas (16) y el número de filas (2).

Finalmente, se crea un objeto *keypad* de la clase *Keypad* para controlar el teclado. Se le pasan como parámetros la matriz *keys*, los arreglos *rowPins* y *colPins*, y las variables *ROWS* y *COLS* que indican el número de filas y columnas del teclado.

Estas definiciones y objetos son esenciales para establecer las conexiones y controlar los periféricos utilizados en el proyecto, como los fotodiodos, la pantalla LCD y el teclado, permitiendo interactuar con el sistema y mostrar información relevante en la pantalla.

Código 1.2 Variables iniciales.

```
// Definir pines de los fotodiodos del sensor solar
const int VPH1_pin = A2;
const int VPH2_pin = A3;
const int VPH3_pin = A0;
const int VPH4_pin = A1;

unsigned long previousMillis = 0; // Variable para almacenar el tiempo anterior
const unsigned long interval = 10;

// Definir pines de la pantalla LCD
const int SDA_pin = A4;
const int SCL_pin = A5;

// Definir teclado 4x4
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {9, 8, 7, 6};
byte colPins[COLS] = {5, 4, 3, 2};

// Crear objeto para el control de la pantalla LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2);

// Crear objeto para el teclado
Keypad keypad = Keypad(makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);
```

6.3 Void Setup()

En esta parte del código se encuentra la función **setup()**, que se ejecuta una sola vez al inicio del programa. En esta función se realizan las siguientes acciones:

1. Se inicializa la comunicación I2C con la pantalla LCD utilizando **Wire.begin()**. Esta función configura los pines SDA y SCL para establecer la comunicación con la pantalla.
2. Se llama al método **init()** del objeto **lcd** para inicializar la pantalla LCD. Esto configura la pantalla con los parámetros especificados al crear el objeto.
3. Se llama al método **backlight()** del objeto **lcd** para encender la retroiluminación de la pantalla LCD, permitiendo que se pueda visualizar la información en la pantalla.
4. Los pines del sensor solar (VPH1_pin, VPH2_pin, VPH3_pin y VPH4_pin) se configuran como entradas utilizando la función **pinMode()**. Esto permite que los fotodiodos del sensor solar puedan enviar señales al microcontrolador para su lectura.

5. Se llama al método **clear()** del objeto **lcd** para limpiar el contenido de la pantalla LCD.
6. Se utiliza el método **print()** del objeto **lcd** para mostrar el mensaje "Bienvenido" en la primera línea de la pantalla LCD.
7. Se utiliza el método **setCursor()** del objeto **lcd** para establecer el cursor en la columna 0 y la fila 1 de la pantalla LCD.
8. Se utiliza nuevamente el método **print()** del objeto **lcd** para mostrar el mensaje "Presione tecla" en la segunda línea de la pantalla LCD.

En resumen, en la función **setup()** se realizan las configuraciones iniciales necesarias para establecer la comunicación con la pantalla LCD, configurar los pines del sensor solar, y mostrar un mensaje de bienvenida en la pantalla.

Código 1.3 Función Void setup().

```
void setup() {  
  // Inicializar comunicación I2C con la pantalla LCD  
  Wire.begin();  
  lcd.init();  
  lcd.backlight();  
  
  // Definir pines del sensor solar como entradas  
  pinMode(VPH1_pin, INPUT);  
  pinMode(VPH2_pin, INPUT);  
  pinMode(VPH3_pin, INPUT);  
  pinMode(VPH4_pin, INPUT);  
  
  lcd.clear();  
  lcd.print("Bienvenido");  
  lcd.setCursor(0, 1);  
  lcd.print("Presione tecla");  
}
```

6.4 Void loop()

En el interior de la función void loop(), se encuentran las siguientes secciones:

1. Lectura de las tensiones de los fotodiodos del sensor solar y cálculo de los ángulos de inclinación.
2. Detección de la tecla pulsada en el teclado 4x4.
3. Visualización de los valores obtenidos en la pantalla LCD de acuerdo a la tecla pulsada.

- **Lectura de las tensiones de los fotodiodos y cálculo de los ángulos de inclinación:**

En esta sección, se realizará la lectura de las tensiones de los fotodiodos del sensor solar y se calcularán los ángulos de inclinación correspondientes. Esto se logra a través de la interacción con el hardware conectado al microcontrolador.

El proceso implica los siguientes pasos:

- ❖ Lectura de las tensiones de los fotodiodos utilizando los pines de entrada/salida adecuados:
 - **analogRead(pin)**: Esta función se utiliza para leer el valor analógico presente en un pin específico del microcontrolador. En este caso, se utiliza para leer las tensiones de los fotodiodos conectados a los pines **VPH1_pin**, **VPH2_pin**, **VPH3_pin** y **VPH4_pin**.
- ❖ Realización de cálculos matemáticos para convertir las tensiones en ángulos de inclinación. Estos cálculos pueden variar según el diseño y características del sensor solar utilizado.
 - **atan2(y, x)**: Esta función calcula el arcotangente de y/x en el cuadrante adecuado, teniendo en cuenta los signos de x e y . Se utiliza para obtener los ángulos de inclinación en función de las diferencias entre las tensiones de los fotodiodos.
- **Detección de la tecla pulsada en el teclado 4x4:**

En esta sección, se detecta la tecla pulsada por el usuario en el teclado 4x4 conectado al microcontrolador. Esto permite que el usuario interactúe con el sistema y realice acciones específicas. se utilizan las funciones proporcionadas por la biblioteca **Keypad** para detectar la tecla pulsada por el usuario en el teclado 4x4.

El proceso puede involucrar los siguientes pasos:

- ❖ Configuración de los pines de entrada/salida utilizados para el teclado 4x4.
- ❖ Lectura del estado de los pines para determinar qué tecla ha sido pulsada.
 - **keypad.getKey()**: Esta función se utiliza para obtener la tecla pulsada en el teclado 4x4. Retorna el carácter correspondiente a la tecla o **NO_KEY** si no se ha pulsado ninguna tecla.
- ❖ Almacenamiento de la tecla pulsada en una variable para su posterior uso.
- **Visualización de los valores obtenidos en la pantalla LCD:**

En esta sección, se muestra en la pantalla LCD la información relevante obtenida del sensor solar y de la tecla pulsada por el usuario, se utilizan las funciones proporcionadas por la biblioteca **LiquidCrystal_I2C**. Esto permite una retroalimentación visual clara y legible.

El proceso puede incluir los siguientes pasos:

- ❖ Configuración de la comunicación con la pantalla LCD y la inicialización correspondiente.
- ❖ Borrado del contenido previo de la pantalla LCD para prepararla para la nueva información.
 - **lcd.clear()**: Esta función se utiliza para borrar el contenido previo de la pantalla LCD, preparándola para mostrar nueva información.
- ❖ Posicionamiento del cursor en la ubicación deseada de la pantalla LCD.
 - **lcd.setCursor(columna, fila)**: Esta función se utiliza para posicionar el cursor en una ubicación específica de la pantalla LCD, donde se mostrará el siguiente texto.
- ❖ Impresión de los valores obtenidos del sensor solar, como los ángulos de inclinación o cualquier otra información relevante.
- ❖ Impresión de la tecla pulsada por el usuario, proporcionando un feedback visual inmediato.
 - **lcd.print(texto)**: Esta función se utiliza para imprimir el texto especificado en la posición actual del cursor en la pantalla LCD.

En el código también se utilizan estructuras condicionales (por ejemplo, **if** y **else if**) para determinar qué valores mostrar en la pantalla LCD según la tecla pulsada por el usuario.

En conjunto, estas secciones dentro de la función **void loop()** permiten la interacción en tiempo real con el sensor solar, la detección de las teclas pulsadas y la visualización de la información correspondiente en la pantalla LCD. Esto brinda una experiencia interactiva y útil para el usuario.

En resumen, estas funciones desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento del programa, permitiendo la lectura de las tensiones del sensor solar, la detección de la tecla pulsada y la visualización de los resultados en la pantalla LCD.

Código 1.4 Función Void loop().

```

void loop() {
  // Leer tensiones de los fotodiodos del sensor solar
  float X1 = VPH3 + VPH4;
  float X2 = VPH1 + VPH2;
  float FX = (X2 - X1) / (X2 + X1);
  float ANGLE_X = atan2(C * FX, 1) * (180 / M_PI);

  float Y1 = VPH1 + VPH4;
  float Y2 = VPH2 + VPH3;
  float FY = (Y2 - Y1) / (Y2 + Y1);
  float ANGLE_Y = atan2(C * FY, 1) * (180 / M_PI);

  // Calcular ángulo  $\alpha$ 
  float ALPHA = atan2(sqrt(tan(ANGLE_X * (M_PI / 180)) * tan(ANGLE_X * (M_PI / 180)) +
tan(ANGLE_Y * (M_PI / 180)) * tan(ANGLE_Y * (M_PI / 180))), 1) * (180 / M_PI);

  // Leer tecla pulsada en el teclado
  char key = keypad.getKey();

  // Mostrar valores en la pantalla LCD según la tecla pulsada
  if (key != NO_KEY) {
    // Si se pulsó una tecla diferente, mostrar su valor inmediatamente
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);

    if (key == '1') {
      if (VPH1 >= 1000) {
        lcd.print("VPH1: ");
        lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V  ");
      } else {
        lcd.print("VPH1: ");
        lcd.print(VPH1, 2);
        lcd.print(" mV  ");
      }
    }

    } else if (key == '2') {
      if (VPH2 >= 1000) {
        lcd.print("VPH2: ");
        lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V  ");
      } else {
        lcd.print("VPH2: ");
        lcd.print(VPH2, 2);
        lcd.print(" mV  ");
      }
    }

    } else if (key == '3') {
      if (VPH3 >= 1000) {
        lcd.print("VPH3: ");

```

```
lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
lcd.print(" V ");
} else {
  lcd.print("VPH3: ");
  lcd.print(VPH3, 2);
  lcd.print(" mV ");
}
} else if (key == '4') {
  if (VPH4 >= 1000) {
    lcd.print("VPH4: ");
    lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V ");
  } else {
    lcd.print("VPH4: ");
    lcd.print(VPH4, 2);
    lcd.print(" mV ");
  }
} else if (key == 'A') {
  lcd.print("ANGLE_X: ");
  lcd.print(ANGLE_X);
} else if (key == 'B') {
  lcd.print("ANGLE_Y: ");
  lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (key == '5') {
  if (VPH1 >= 1000) {
    lcd.print("1: ");
    lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
  } else {
    lcd.print("1: ");
    lcd.print(VPH1, 2);
  }
}
if (VPH3 >= 1000) {
  lcd.print("3: ");
  lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
  lcd.print(" V");
} else {
  lcd.print("3: ");
  lcd.print(VPH3, 2);
}
}
lcd.setCursor(0, 1);
if (VPH2 >= 1000) {
  lcd.print("2: ");
  lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
  lcd.print(" V");
} else {
  lcd.print("2: ");
  lcd.print(VPH2, 2);
}
}
if (VPH4 >= 1000) {
  lcd.print("4: ");
  lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
```

```

    lcd.print(" V");
  } else {
    lcd.print("4: ");
    lcd.print(VPH4, 2);
  }
} else if (key == '6') {
  lcd.print("ANGLE_X: ");
  lcd.print(ANGLE_X);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("ANGLE_Y: ");
  lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (key == '7') {
  lcd.print("SUN_RAY: ");
  lcd.print(ALPHA);
}

// Almacenar la tecla pulsada actual como la tecla anterior
previousKey = key;
lastKeyPressTime = millis();
} else {
  // Si no se pulsó ninguna tecla diferente, actualizar la última tecla pulsada cada medio segundo
  if (millis() - lastKeyPressTime >= interval) {
    lcd.setCursor(0, 0);

    if (previousKey == '1') {
      if (VPH1 >= 1000) {
        lcd.print("VPH1: ");
        lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V ");
      } else {
        lcd.print("VPH1: ");
        lcd.print(VPH1, 2);
        lcd.print(" mV ");
      }
    }
    } else if (previousKey == '2') {
      if (VPH2 >= 1000) {
        lcd.print("VPH2: ");
        lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V ");
      } else {
        lcd.print("VPH2: ");
        lcd.print(VPH2, 2);
        lcd.print(" mV ");
      }
    }
    } else if (previousKey == '3') {
      if (VPH3 >= 1000) {
        lcd.print("VPH3: ");
        lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V ");
      } else {
        lcd.print("VPH3: ");

```

```
    lcd.print(VPH3, 2);
    lcd.print(" mV ");
}
} else if (previousKey == '4') {
if (VPH4 >= 1000) {
    lcd.print("VPH4: ");
    lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V ");
} else {
    lcd.print("VPH4: ");
    lcd.print(VPH4, 2);
    lcd.print(" mV ");
}
}
} else if (previousKey == 'A') {
    lcd.print("ANGLE_X: ");
    lcd.print(ANGLE_X);
} else if (previousKey == 'B') {
    lcd.print("ANGLE_Y: ");
    lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (previousKey == '5') {
if (VPH1 >= 1000) {
    lcd.print("1:");
    lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("1:");
    lcd.print(VPH1, 2);
    lcd.print(" ");
}
}
if (VPH3 >= 1000) {
    lcd.print("3:");
    lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("3:");
    lcd.print(VPH3, 2);
}
}
lcd.setCursor(0, 1);
if (VPH2 >= 1000) {
    lcd.print("2:");
    lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("2:");
    lcd.print(VPH2, 2);
    lcd.print(" ");
}
}
if (VPH4 >= 1000) {
    lcd.print("4:");
    lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
```

```
    lcd.print("4:");
    lcd.print(VPH4, 2);
  }
} else if (previousKey == '6') {
  lcd.print("ANGLE_X: ");
  lcd.print(ANGLE_X);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("ANGLE_Y: ");
  lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (previousKey == '7') {
  lcd.print("SUN_RAY: ");
  lcd.print(ALPHA);
}

lastKeyPressTime = millis();
}
}
```

7 ENSAYOS Y ANÁLISIS DEL SENSOR SOLAR

El presente apartado tiene como objetivo principal realizar ensayos y análisis exhaustivos al sensor, con el fin de estudiar y comprender el comportamiento de las tensiones generadas por el mismo bajo diferentes condiciones de alturas y ángulos. Además, se llevará a cabo un análisis de las proyecciones en los ejes X e Y del ángulo de incidencia solar.

En el marco de este estudio, se realizarán pruebas específicas que permitirán evaluar el comportamiento de las tensiones del sensor en relación con la variación de la altitud y el ángulo de inclinación.

Comprender cómo el sensor reacciona ante diferentes ángulos de incidencia solar permitirá optimizar su rendimiento y aplicabilidad en entornos que dependen de esta fuente energética.

Mediante la ejecución de estas pruebas y análisis, se espera obtener datos precisos y confiables sobre el comportamiento del sensor en diferentes condiciones. Esta información será fundamental para mejorar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos a través del sensor, así como para su posible adaptación y optimización en futuros proyectos y aplicaciones.

7.1 Pruebas : Escenario, configuración y metodología

El proceso de medición de nuestro sensor se vio inicialmente afectado por la interferencia de la luz solar, lo que generaba resultados imprecisos y dificultaba la obtención de datos confiables. La falta de control sobre ciertos parámetros, como la intensidad y la dirección de la luz solar, planteó un desafío significativo para la precisión de las mediciones.

Conscientes de la importancia de obtener resultados precisos, se llevó a cabo un riguroso análisis para identificar posibles soluciones. Tras evaluar diferentes enfoques, se decidió diseñar un soporte personalizado que permitiera realizar mediciones de manera más precisa y consistente, minimizando la influencia de la luz solar no deseada.

El soporte diseñado incluye una linterna de precisión ajustable, que permite iluminar de manera controlada el entorno de prueba. Al utilizar una linterna de precisión, pudimos direccionar la luz de manera específica hacia el sensor, minimizando así las fuentes de luz no deseadas y asegurando mediciones más precisas.

Con esta solución, logramos un control riguroso sobre los parámetros ambientales durante las pruebas, lo que resultó en mediciones más exactas y confiables. A continuación, exploraremos en detalle la configuración y la metodología implementada para llevar a cabo las pruebas con el sensor y el soporte diseñado.



Figura 7-1 Soporte diseñado.

Una vez resuelto el desafío de la interferencia de la luz solar, nos enfrentamos a otro aspecto crítico para asegurar mediciones precisas: establecer una línea estable de medición en el sensor. Para abordar este problema, implementamos un enfoque utilizando una morsa y alturas.

El sensor se colocó en una morsa de manera horizontal, lo que proporcionó una base sólida y estable para llevar a cabo las mediciones. Esta configuración permitió minimizar cualquier movimiento o vibración no deseada durante las pruebas, lo que garantizó resultados más precisos y confiables.



Figura 7-2 Sensor posicionado en la morsa 1.

Para establecer una línea estable de medición, se tomaron diferentes alturas desde la base del sensor hasta el soporte. Estas alturas variadas permitieron explorar y evaluar el rendimiento del sensor en diferentes posiciones y ángulos, lo cual es crucial para comprender su comportamiento en condiciones diversas.



Figura 7-3 Sensor posicionado en la morsa 2.

El proceso consistió en medir y registrar los resultados obtenidos en cada altura. Esto nos proporcionó un conjunto de datos completo y detallado para analizar la sensibilidad y la respuesta del sensor en diferentes configuraciones.

7.2 Resultados

En esta sección, presentaremos los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con el sensor a diferentes alturas y ángulos. Para facilitar la recopilación y análisis de los datos, se ha utilizado un programa en Python (que dejaremos en el anexo) que genera una tabla en un archivo Excel con todas las mediciones realizadas. A continuación, explicaremos en detalle cómo se ha llevado a cabo este proceso:

1. **Configuración del programa:** El programa en Python se encarga de establecer la comunicación con el sensor a través del puerto serie especificado y una velocidad determinada. Se ha utilizado la biblioteca **serial** para manejar la comunicación con el dispositivo.
2. **Creación del archivo Excel y las columnas:** El programa crea un nuevo archivo Excel y agrega una hoja llamada "Data from Serial". A continuación, se definen las columnas que contendrá la tabla de datos. En el ejemplo proporcionado, se han utilizado las columnas "Date Time", "t250ms", "S1", "S2", "S3" y "S4". Estas columnas representan los diferentes parámetros medidos durante los ensayos.
3. **Realización de los ensayos:** El programa comienza a leer los datos del puerto serie y los almacena en el archivo Excel. Se establece un límite de registros (**number**) para controlar la cantidad de mediciones que se deben realizar.
4. **Finalización de los ensayos y generación del archivo Excel:** El programa puede ser detenido manualmente utilizando la señal SIGINT (por ejemplo, presionando Ctrl+C en el terminal). Al finalizar la lectura de los datos, se guarda el archivo Excel con el nombre especificado.

El archivo Excel resultante contiene una tabla completa con todos los datos registrados durante los ensayos. Cada fila representa una medición en un momento específico, y cada columna corresponde a un parámetro medido.

Se espera que la tabla de entrada tenga 45 bloques de datos, cada uno con 50 filas y 11 columnas. Estos datos se asignan a la matriz ensayos. Las columnas de la tabla original se omiten en la asignación, ya que solo se almacenan los datos numéricos en ensayos. La matriz ensayos guarda los valores de los ensayos realizados en cada bloque, mientras que las columnas se corresponden con las variables específicas definidas en el vector variables.

Este enfoque proporciona una forma eficiente y organizada de recopilar y analizar los resultados de las mediciones del sensor en diferentes alturas y ángulos, facilitando la interpretación y la extracción de conclusiones relevantes.

Se utilizará MATLAB para trabajar con los datos obtenidos y generar gráficas y tablas de interés. Para ello, se creará una clase llamada "DataClass"(incluida en el anexo) que contendrá métodos para manejar la tabla de datos importada desde el archivo Excel. A continuación, se explicará en detalle cómo se utilizará esta clase para realizar diversas operaciones:

- Generación de gráficas: La función **graficaTensiones** permite visualizar las tensiones registradas en los ensayos. Si se proporciona el ensayo **ens**, se graficarán las tensiones correspondientes a un ensayo específico. De lo contrario, se graficarán todas las tensiones presentes en la tabla de datos. La función muestra una gráfica con los valores de tensión en función de las muestras, permitiendo visualizar la variación a lo largo del tiempo.
- Extracción de datos por ensayo: El método **getEnsayo** permite extraer los datos de un ensayo específico. Se deben proporcionar los parámetros **x**, **y** y **h** para identificar el ensayo deseado. La función devuelve una tabla con los datos correspondientes a ese ensayo, incluyendo los parámetros "t250ms", "xEnsayo", "yEnsayo", "alturaEnsayo", "VPH1", "VPH2", "VPH3", "VPH4", "ANGLE_X", "ANGLE_Y" y "ALPHA".

En el código proporcionado, el vector *variables* contiene los nombres de las variables que se utilizarán para las columnas de la tabla de datos. Estos nombres representan diferentes aspectos de los ensayos realizados. Aquí está una descripción de cada variable:

1. "t250ms": Esta variable representa el tiempo en intervalos de 250 milisegundos. Se utiliza como una columna de tiempo para registrar el momento en que se tomaron las muestras.
2. "xEnsayo": Esta variable representa la coordenada x de los ensayos. Es una medida de posición.

3. "yEnsayo": Esta variable representa la coordenada y de los ensayos. Es una medida de posición.
4. "alturaEnsayo": Esta variable representa la altura de los ensayos. Es una medida de altura o distancia en el eje z.
5. "VPH1", "VPH2", "VPH3", "VPH4": Estas variables representan los valores de las señales VPH en los ensayos. Son medidas de los diferentes fotodiodos.
6. "ANGLE_X": Esta variable representa el ángulo en el eje x en los ensayos. Es una medida de inclinación o rotación alrededor del eje x.
7. "ANGLE_Y": Esta variable representa el ángulo en el eje y en los ensayos. Es una medida de inclinación o rotación alrededor del eje y.
8. "ALPHA": Esta variable representa el valor de alfa en los ensayos. Es una medida de inclinación o rotación alrededor del ángulo de incidencia solar.

Generación de histogramas: La función **graficaHistograma** permite generar un histograma de las tensiones registradas en un ensayo específico. Se deben proporcionar los parámetros **ens**, **y**, **h** y **t** para identificar el ensayo y la variable a considerar. Si el argumento **t** contiene varios valores, se calculará el promedio de las tensiones correspondientes y se generará un histograma para ese promedio. De lo contrario, se generará un histograma de las tensiones individuales.

La clase **DataClass** proporciona una estructura organizada para trabajar con los datos importados y facilita la extracción y el análisis de la información de interés.

Para llevar a cabo los ensayos, se ha establecido un plan sistemático que incluye mediciones a diferentes alturas y ángulos con el objetivo de evaluar las proyecciones del sensor. A continuación, se detalla el procedimiento planificado:

1. **Alturas de las mediciones:** Se realizarán mediciones a diferentes alturas con respecto a la superficie del sensor. Estas alturas específicas son: 10 cm, 13 cm, 16 cm y 22 cm. Al variar la altura, se busca evaluar cómo afecta la posición relativa del sensor a las mediciones realizadas.
2. **Ángulos de los ensayos:** Se llevarán a cabo ensayos en diferentes ángulos para analizar la influencia de la orientación del sensor en las mediciones. Los ángulos seleccionados son los siguientes:
 - ENSAYO X=0° Y=0°: El sensor se mantendrá en una posición horizontal y se tomarán las mediciones correspondientes.
 - ENSAYO X=15° Y=0°: Se inclinará el sensor en un ángulo de 15° con respecto al eje X y se registrarán las mediciones.
 - ENSAYO X=0° Y=15°: El sensor se inclinará en un ángulo de 15° con respecto al eje Y y se realizarán las mediciones correspondientes.
 - ENSAYO X=45° Y=0°: Se ajustará el sensor a un ángulo de 45° en el eje X y se registrarán las mediciones.
 - ENSAYO X=0° Y=45°: El sensor se inclinará a un ángulo de 45° en el eje Y y se realizarán las mediciones correspondientes.

En cada ensayo, se tomarán las mediciones de acuerdo con las alturas y ángulos específicos establecidos anteriormente. Estos ensayos nos permitirán comprender cómo varían las proyecciones del sensor en diferentes condiciones y evaluar su desempeño en cada configuración.

7.3 ENSAYO X=0° Y=0°

En los ensayos que se realizarán, se presentarán gráficas que contendrán 50 muestras en cada una de ellas. Estas gráficas constituirán una herramienta fundamental para visualizar y analizar los datos.

Al contar con 50 muestras en cada ensayo, dispondrán de un tamaño de muestra suficientemente grande para obtener resultados significativos. Esto permitirá llevar a cabo análisis estadísticos y detectar posibles patrones, variaciones o correlaciones entre las variables que estamos investigando.

❖ A 10 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

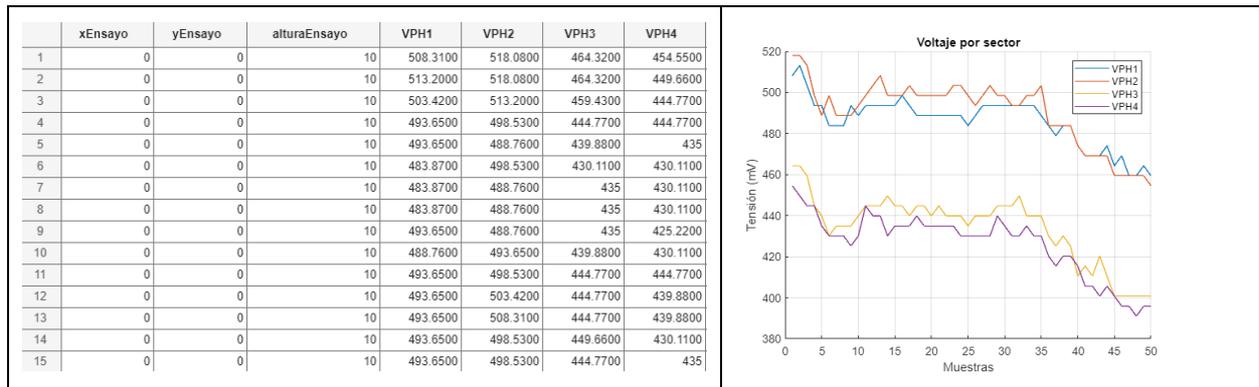


Figura 7-4 Datos recogidos en el ensayo.

(Sólo incluimos una parte de la tabla ya que consideramos innecesario añadirla entera)

Podemos observar en la figura 7-4 el conjunto completo de valores obtenidos para las tensiones en diferentes muestras. Así, podemos apreciar la tendencia que siguen a lo largo de la prueba.

Nuestras gráficas muestran una tendencia decreciente que resultó ser un hallazgo interesante en nuestra investigación. Descubrimos que la intensidad de la luz utilizada para enfocar el sensor disminuía gradualmente, lo que a su vez provocaba una caída en las tensiones de los fotodiodos del sensor.

Aunque inicialmente esto podría haberse considerado un problema, aprovechamos esta circunstancia para examinar de cerca el comportamiento de nuestro sistema en condiciones desafiantes. Esta situación nos brindó una valiosa oportunidad para estudiar cómo el sensor respondía a la disminución de intensidad lumínica y cómo se adaptaba a ella.

Los histogramas de las tensiones muestran de manera más clara una representación de las gráficas, con valores promedio que se han medido en este ensayo.

La disposición para los histogramas del valor medio de las tensiones siguen el siguiente orden como se muestra en la figura 7-5.



Figura 7-5 Orden de los cuadrantes

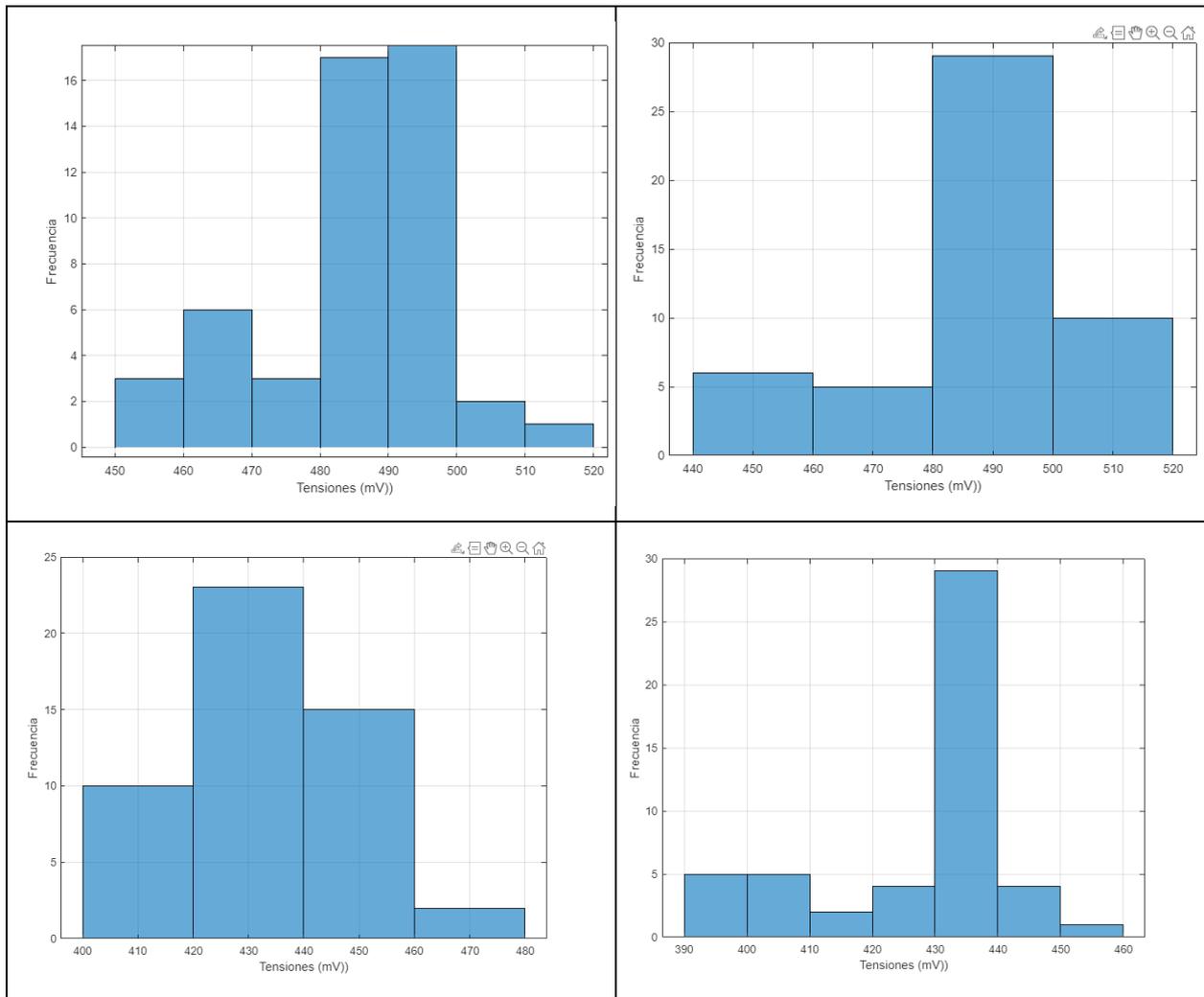


Figura 7-6 Histogramas de las tensiones a 10 cm del ensayo 7.3

Vemos claramente que debido al funcionamiento del sensor, las tensiones VPH1 y VPH2 presentan comportamientos similares, al igual que las tensiones VPH3 y VPH4.

Además, podemos observar que el valor medio de las tensiones en cada uno de los sectores tienen los siguientes valores:

- ❖ **VPH1:** 450-500 mV.
- ❖ **VPH2:** 450-500 mV.
- ❖ **VPH3:** 420-440 mV.
- ❖ **VPH4:** 430-440 mV.

- A 13 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

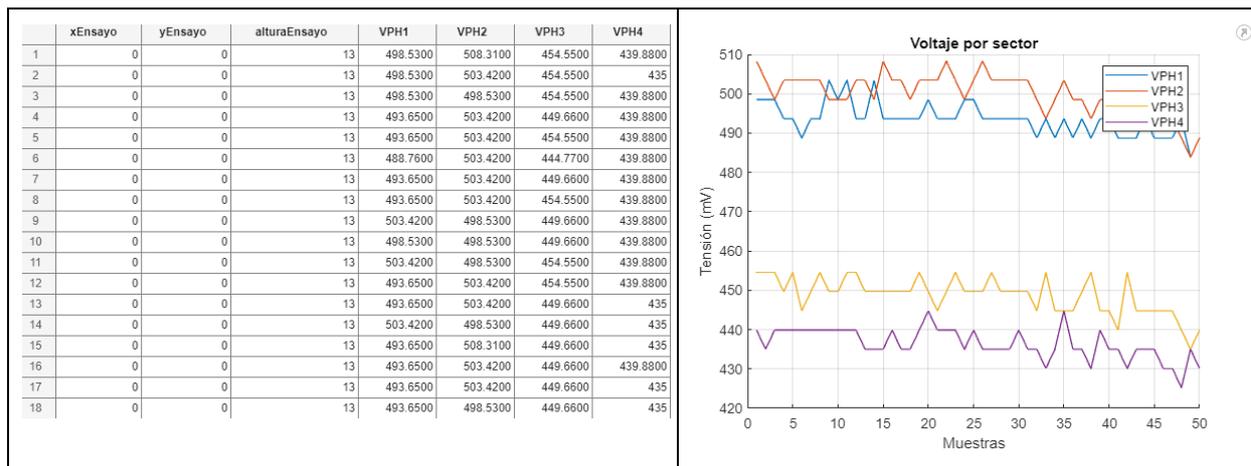
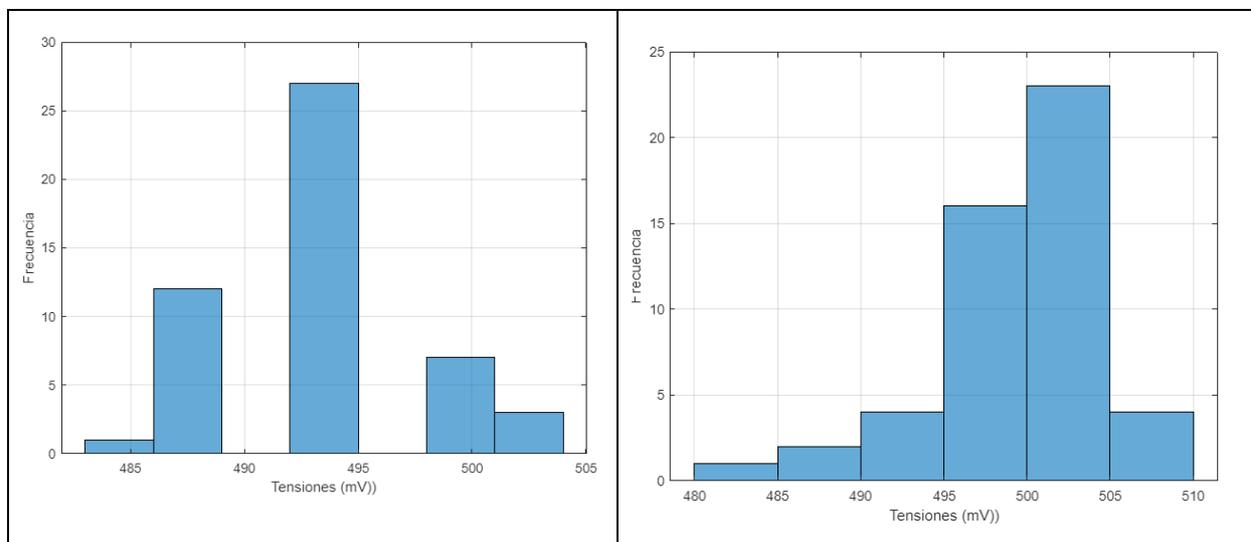


Figura 7-7 Datos recogidos en el ensayo.

Podemos observar en la figura 7-6 el conjunto completo de valores obtenidos para las tensiones en diferentes muestras. Así, podemos apreciar la tendencia que siguen a lo largo de la prueba.

De igual forma, los histogramas de las tensiones muestran de manera más clara una representación de las gráficas, con valores promedio que se han medido en este ensayo.



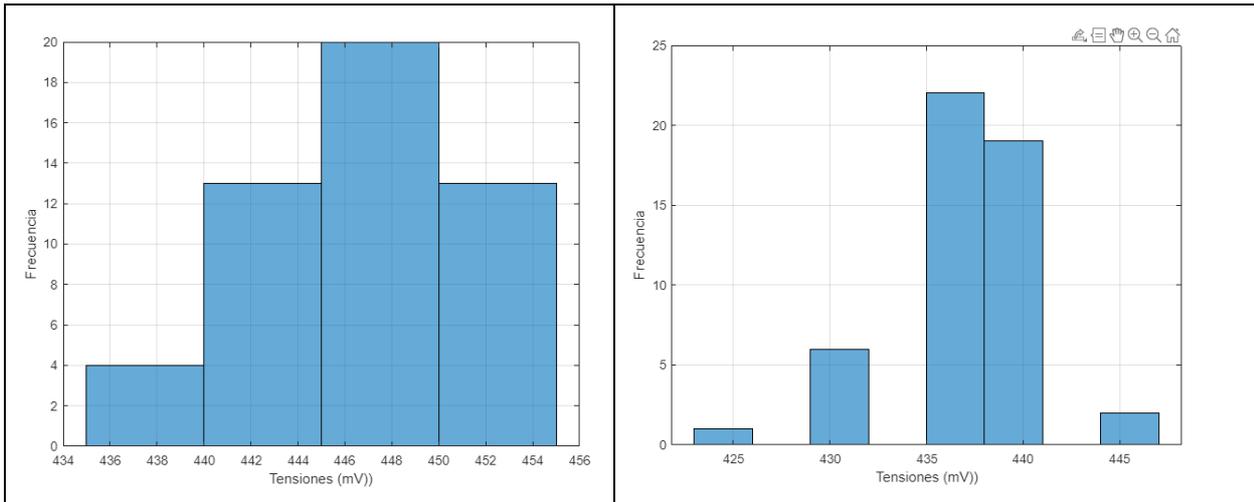


Figura 7-8 Histogramas de las tensiones a 13 cm del ensayo 7.3

De manera similar al apartado anterior, podemos observar claramente que debido al funcionamiento del sensor, las tensiones VPH1 y VPH2 presentan comportamientos similares, al igual que las tensiones VPH3 y VPH4.

Además, podemos observar que el valor medio de las tensiones en cada uno de los sectores tienen los siguientes valores:

- ❖ **VPH1:** 430-450 mV.
- ❖ **VPH2:** 500-505 mV.
- ❖ **VPH3:** 445-450 mV.
- ❖ **VPH4:** 435-437 mV.

- A 16 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

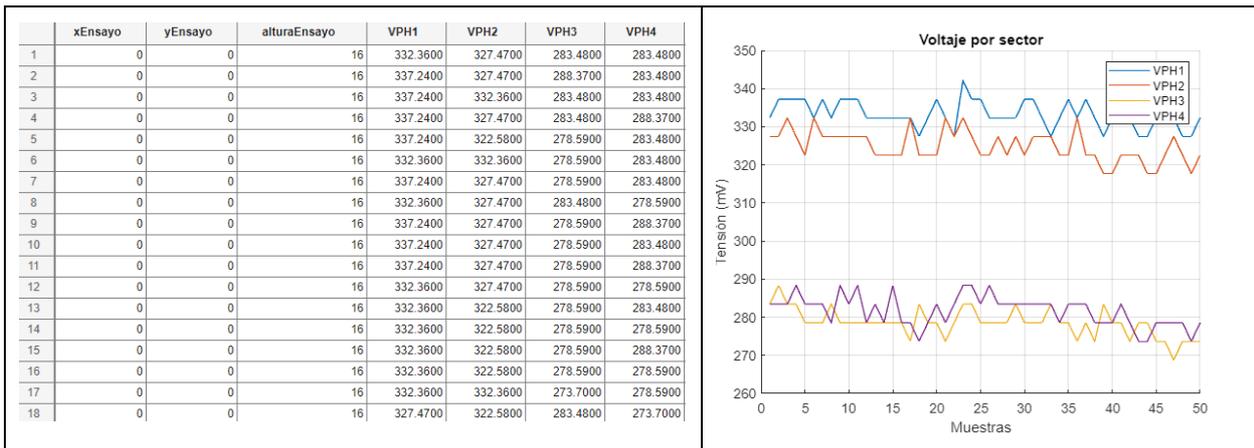


Figura 7-9 Datos recogidos en el ensayo.

De igual forma, los histogramas de las tensiones muestran más claramente una traducción de las gráficas, con valores promedios que se han medido en este ensayo.

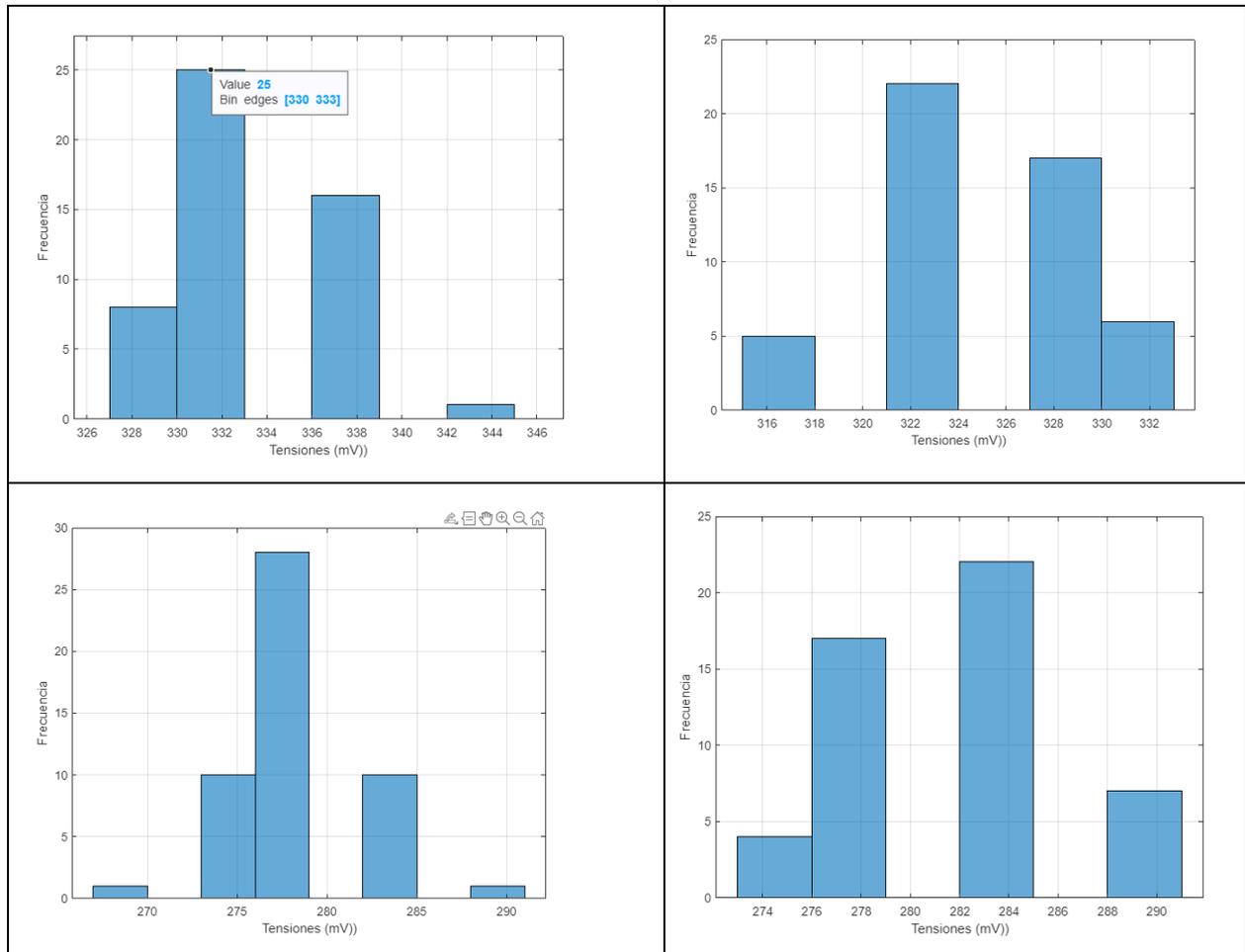


Figura 7-10 Histogramas de las tensiones a 16 cm del ensayo 7.3

De la misma manera que el apartado anterior, vemos claramente que debido al funcionamiento del sensor las tensiones VPH1 y VPH2 tienen comportamientos parecidos, mientras que entre VPH3 y VPH4 también lo tienen entre sí.

Además, podemos observar que las tensiones de cada uno de los sectores suelen rondar mayoritariamente los siguientes valores:

- ❖ **VPH1:** 330-330 mV.
- ❖ **VPH2:** 321-324 mV.
- ❖ **VPH3:** 276-279 mV.
- ❖ **VPH4:** 282-285 mV.

Finalmente, observamos que ya a mayor altura las tensiones van decayendo.

Después de haber analizado los resultados de las pruebas de manera progresivamente lineal, el resto de las pruebas se llevarán a cabo únicamente a 10 cm y 22 cm. De esta manera, podremos observar solo los casos más extremos entre sí.

7.4 ENSAYO X=15° Y=0°

- A 10 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

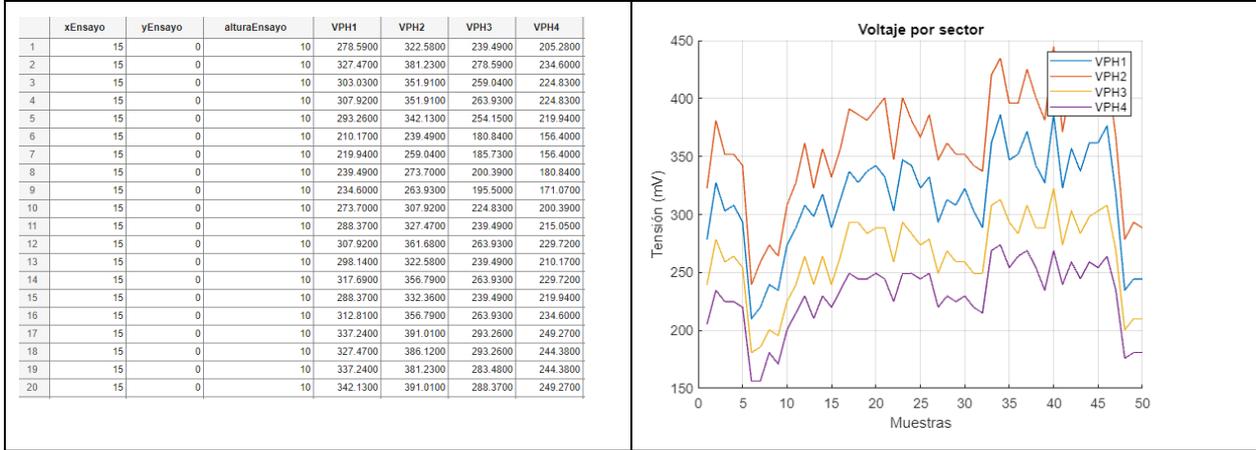
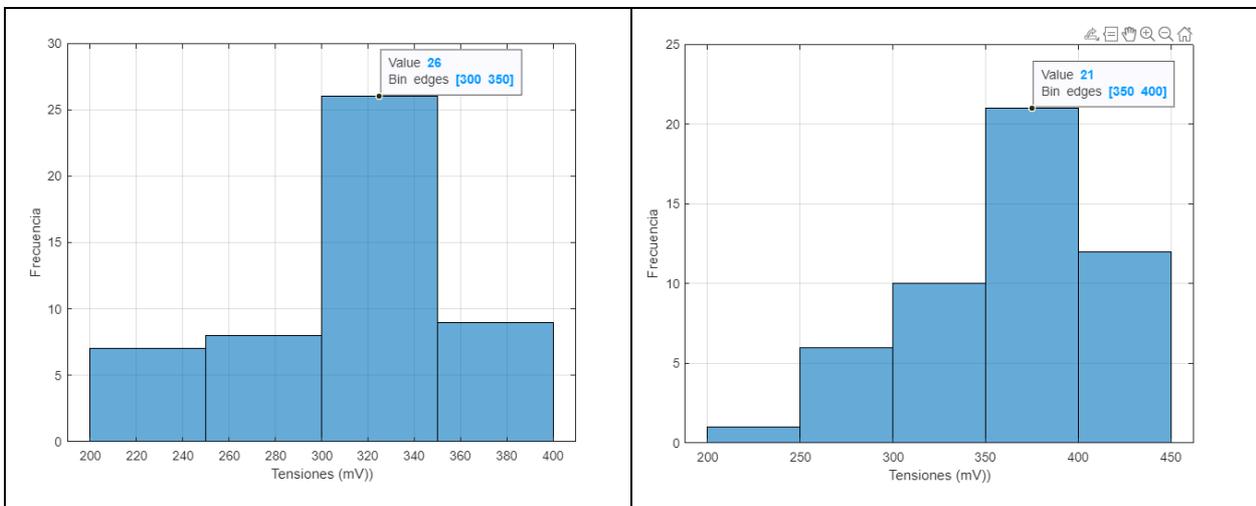


Figura 7-11 Datos recogidos en el ensayo.

En la figura 7-14 se puede apreciar que cuando se incluyen variaciones más significativas en las proyecciones del ángulo de incidencia solar, las gráficas se vuelven más inestables. Esto se debe a que el sensor es altamente sensible a las perturbaciones.

En este ensayo, también se observa que la tendencia de la gráfica es diferente a la anterior debido a la inclinación con la que incide el rayo de luz. Esto provoca, por ejemplo, que VPH2 sea el fotodiodo que recibe mayor intensidad.

Además, en cada una de las gráficas, se puede observar que las tensiones de cada uno de los sectores generalmente tienen los siguientes valores predominantes:



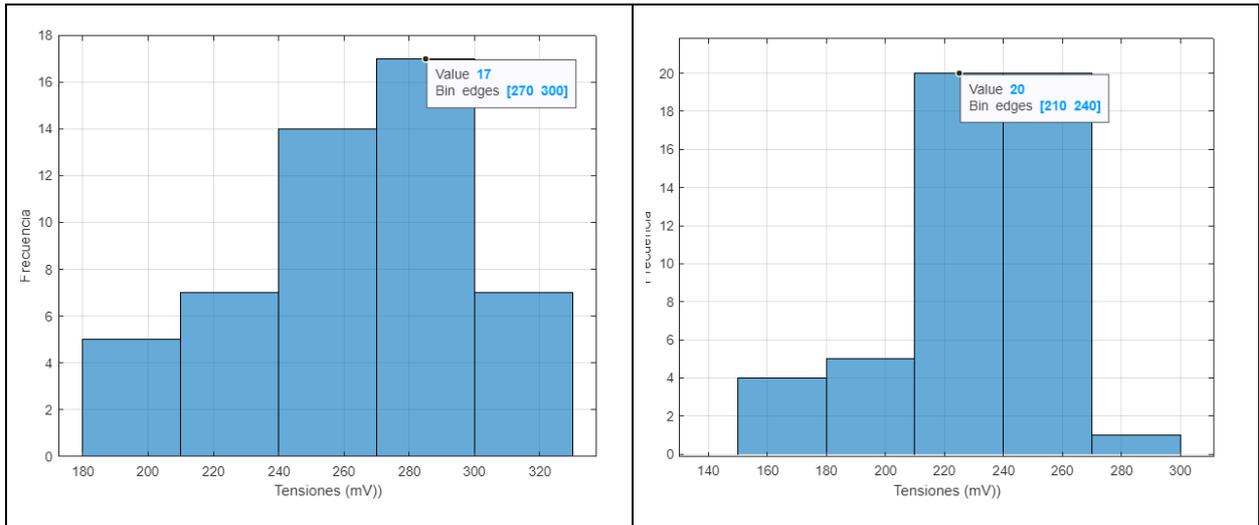


Figura 7-12 Histogramas de las tensiones a 10 cm del ensayo 7.4

- A 22 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

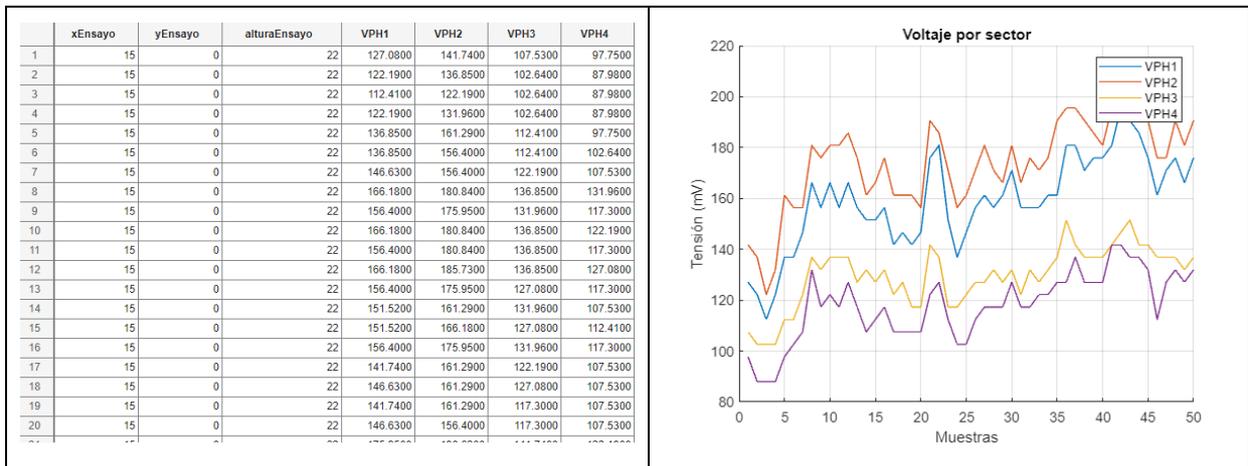


Figura 7-13 Datos recogidos en el ensayo.

Se aprecia una similitud en el comportamiento en comparación con la sección anterior. Sin embargo, como se sospechaba, las tensiones son más bajas debido a la elevada altura en este caso.

En cada una de las representaciones gráficas, se puede observar que las tensiones en los diferentes sectores generalmente se sitúan en los siguientes valores predominantes:



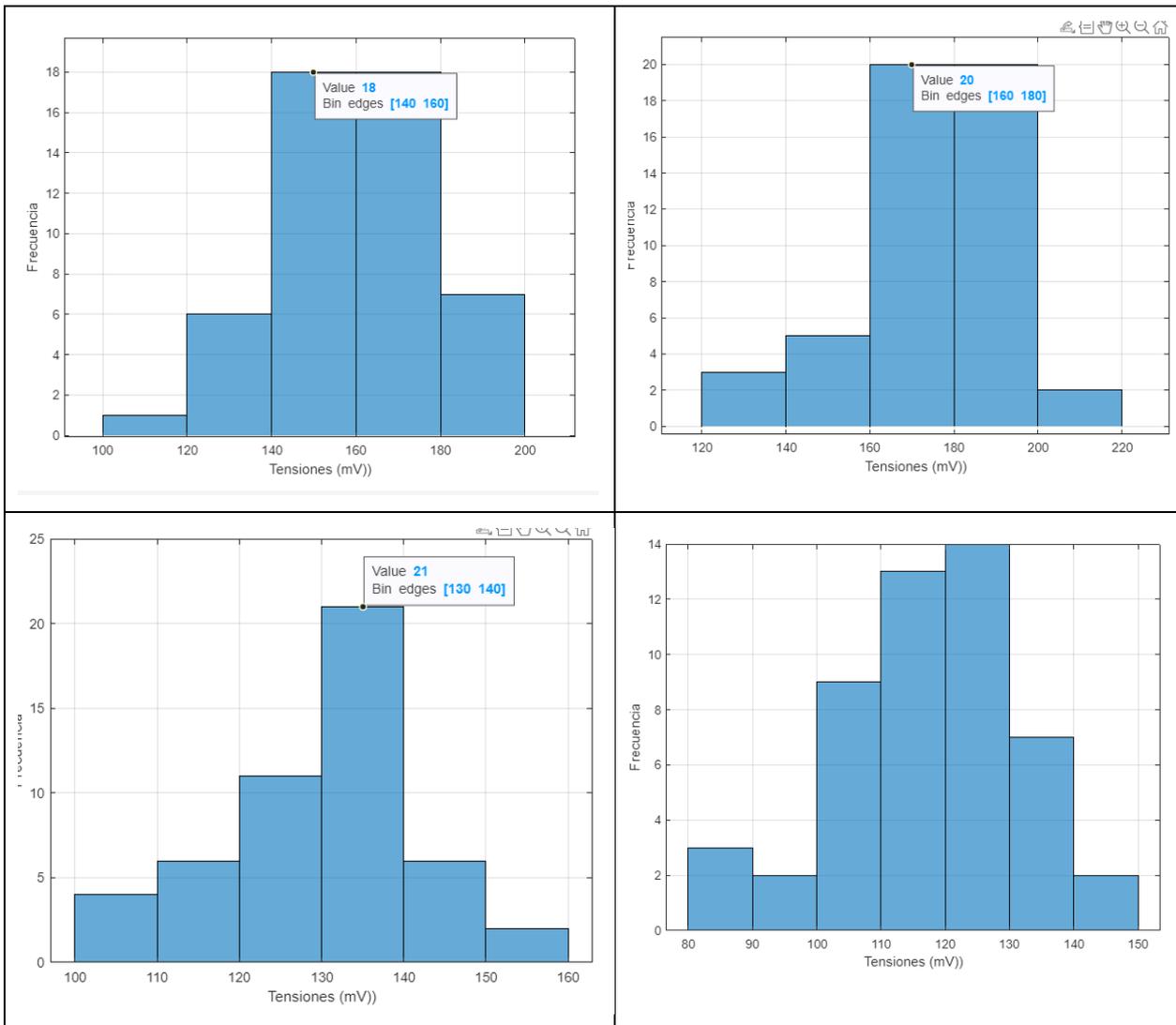


Figura 7-14 Histogramas de las tensiones a 22 cm del ensayo 7.4

Para cotejar que estos valores son válidos, el ángulo de incidencia solar en esta prueba debe de rondar los 15°. Ya que al ser el *ángulo* y relativamente 0°, pues llegamos a la conclusión de que el ángulo de incidencia solar es igual que el ángulo de la proyección de x.

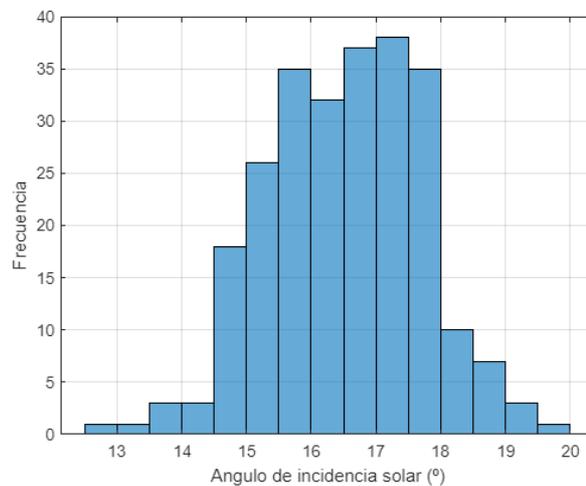


Figura 7-15 Histograma a 22 cm.

7.5 ENSAYO $X=0^\circ$ $Y=15^\circ$

- A 10 cm:

Al igual que en secciones anteriores, tomaremos en cuenta las diferentes tablas de datos, aunque en este punto consideramos no incluirlas. Hemos dejado constancia de ellas en secciones anteriores y las gráficas reflejan fielmente dichos datos.

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

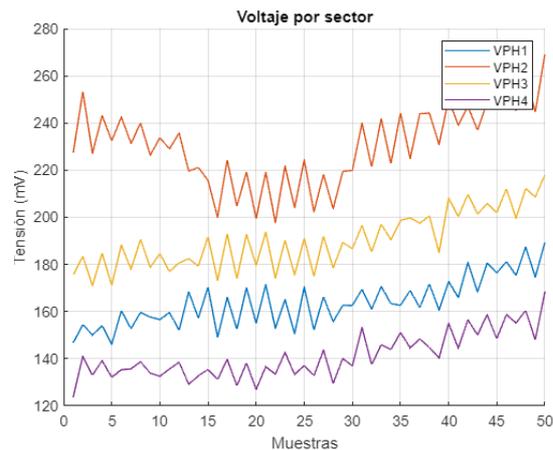


Figura 7-16 Datos recogidos en el ensayo.

Una vez más, podemos verificar en la figura 7-19 que al considerar variaciones más notables en las proyecciones del ángulo de incidencia solar, las representaciones gráficas se vuelven más inestables. Esto se debe a que el sensor es altamente sensible a las perturbaciones.

En este análisis adicional, también podemos notar que la tendencia de la gráfica difiere de la anterior debido a la inclinación con la que el rayo de luz incide. Esto resulta en que, por ejemplo, el fotodiodo VPH2 reciba la mayor intensidad lumínica.

Adicionalmente, en cada una de las representaciones gráficas, podemos observar que las tensiones de los diferentes sectores generalmente oscilan alrededor de los siguientes valores predominantes:



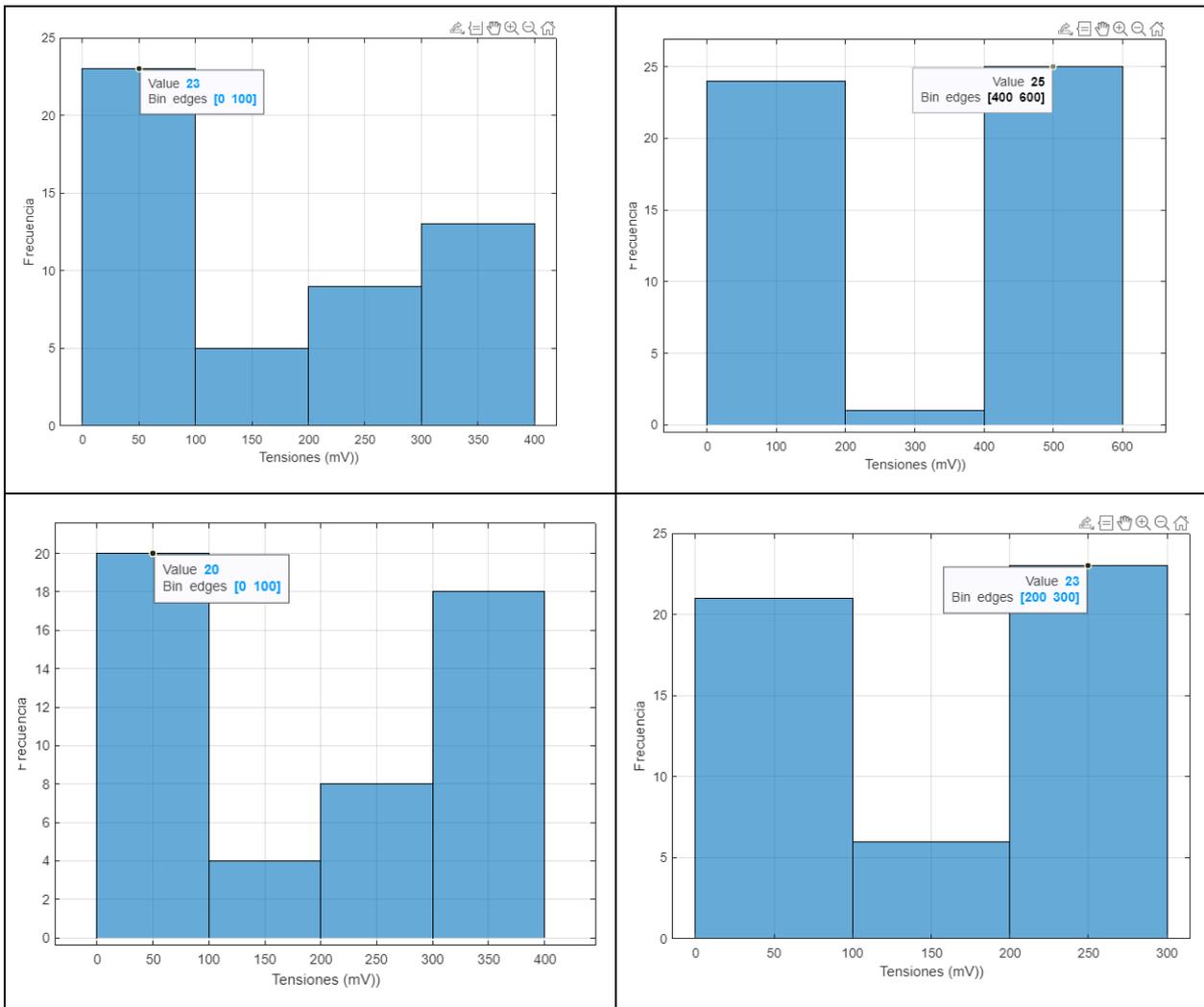


Figura 7-17 Histograma del ensayo 7.5 a 10 cm

- A 22 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

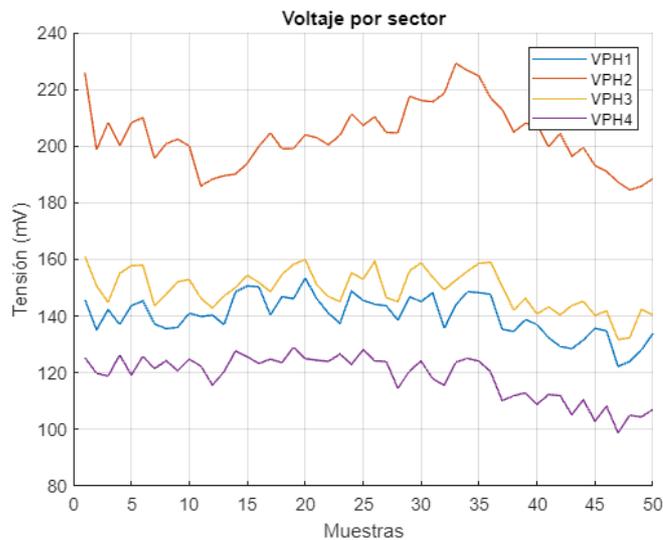


Figura 7-18 Gráfica de los datos recogidos en este ensayo.

El comportamiento exhibido guarda una similitud estructural con el apartado previo, no obstante, como se

anticipaba, se observa una disminución en las tensiones, atribuible a la mayor altitud en este escenario particular.

Cabe destacar que, en cada una de las representaciones gráficas, se evidencia que las tensiones en los distintos sectores tienden a converger mayoritariamente hacia los siguientes valores predominantes:

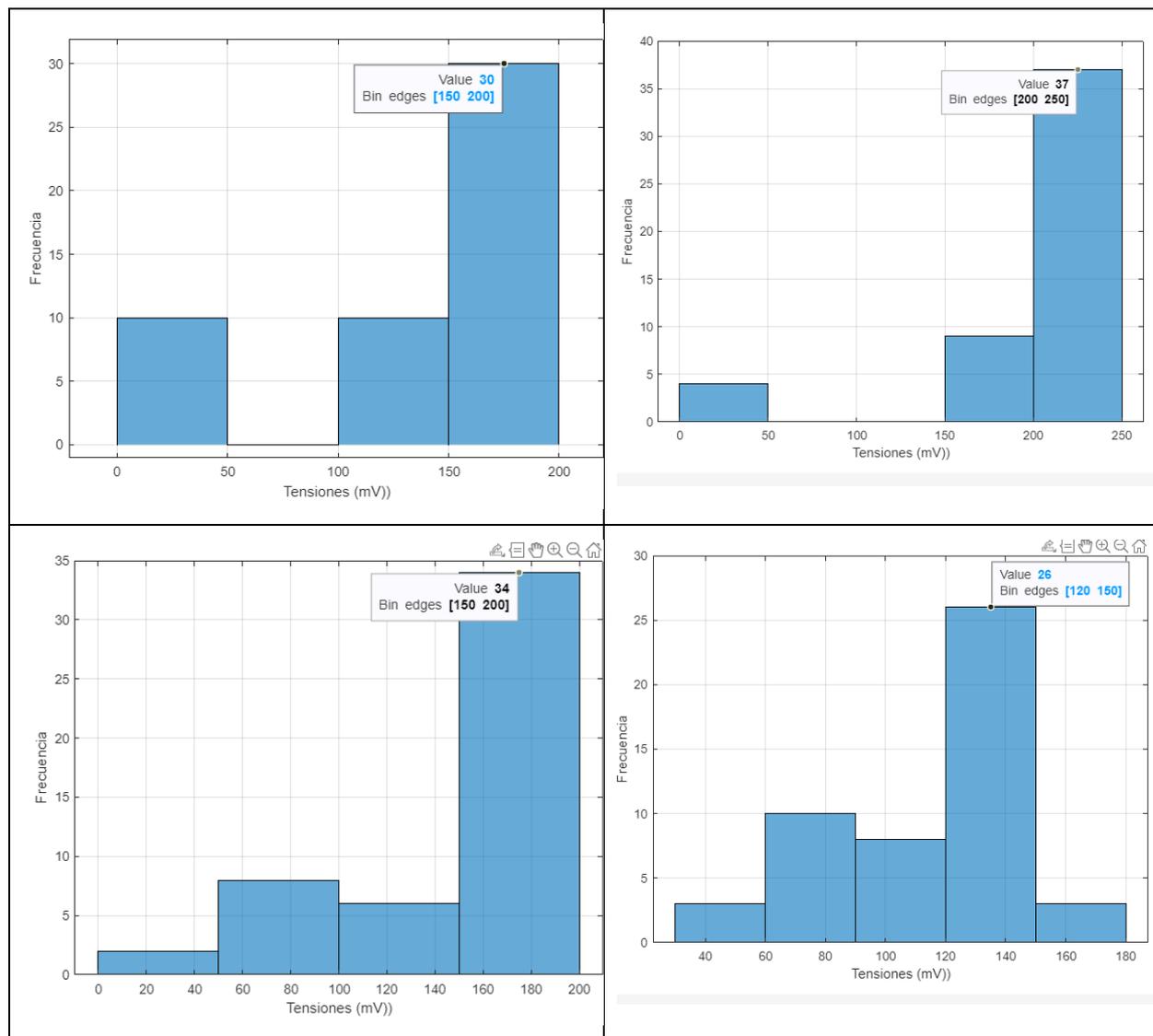


Figura 7-19 Histograma de tensiones a 22 cm del ensayo 7.5

Con el fin de verificar la validez de estos valores, en esta prueba el ángulo de incidencia solar debe aproximarse a los 15° . Dado que el *ángulo x* es relativamente cercano a 0° , podemos concluir que el ángulo de incidencia solar es igual al ángulo de proyección en el eje y.

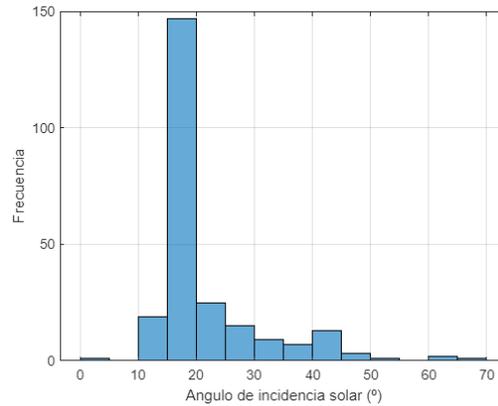


Figura 7-20 Histograma a 22cm.

7.6 ENSAYO X=45° Y=0°

- A 10 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

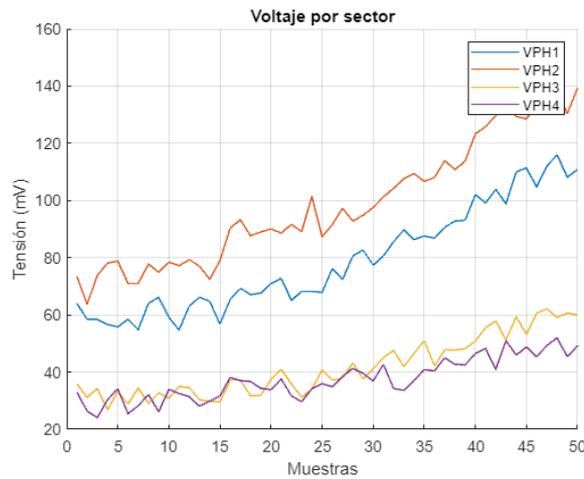


Figura 7-21 Datos recogidos en el ensayo.

En la gráfica representada, se observa un incremento gradual de las tensiones a medida que avanzan las muestras. Este comportamiento se atribuye al hecho de que el sensor requería tiempo para adaptarse a la medición del ángulo, el cual ya presentaba una notoria variación.

A medida que se registran las muestras, se aprecia un progresivo aumento en las tensiones, lo cual sugiere que el sensor estaba ajustando su respuesta para captar con mayor precisión el ángulo de incidencia. Esta adaptación gradual del sensor permite obtener mediciones más confiables a medida que transcurre el tiempo y se estabiliza su funcionamiento.

Además, al examinar cada una de las representaciones gráficas, se puede constatar que las tensiones de los distintos sectores tienden a fluctuar en torno a los siguientes valores predominantes:

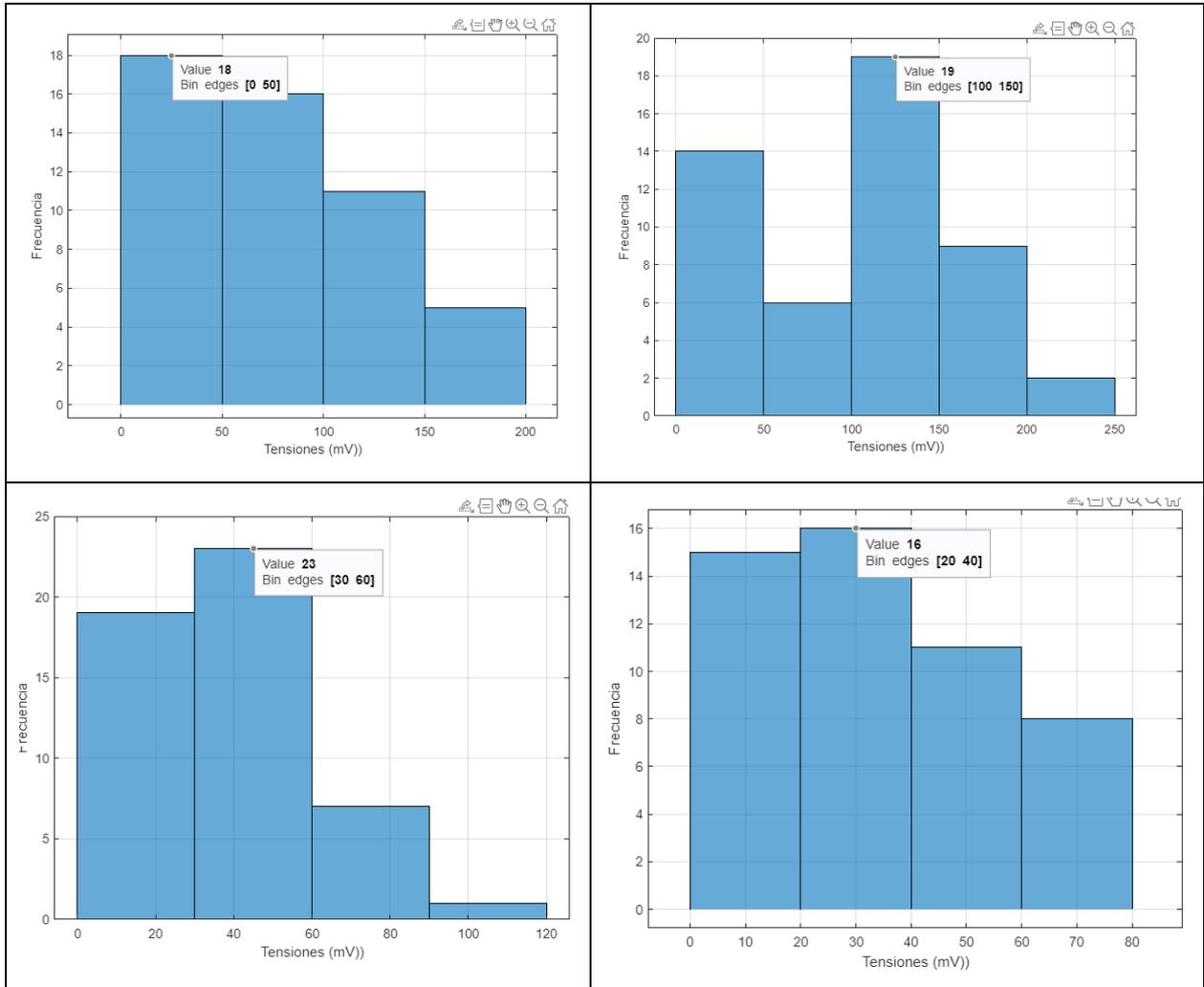


Figura 7-22 Rango de tensiones del ensayo 7.6 a 10 cm.

- A 22 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

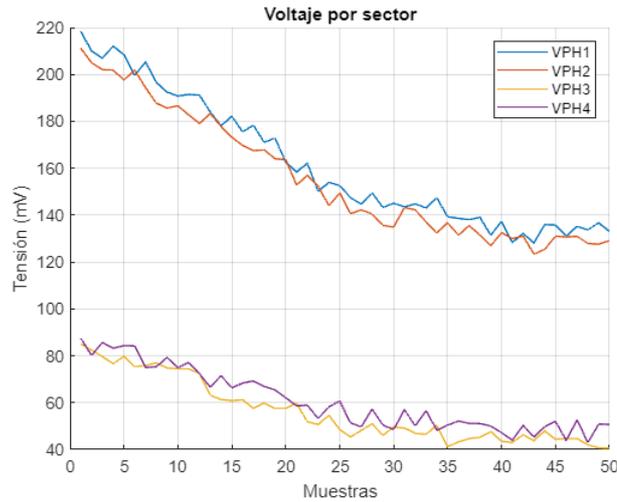
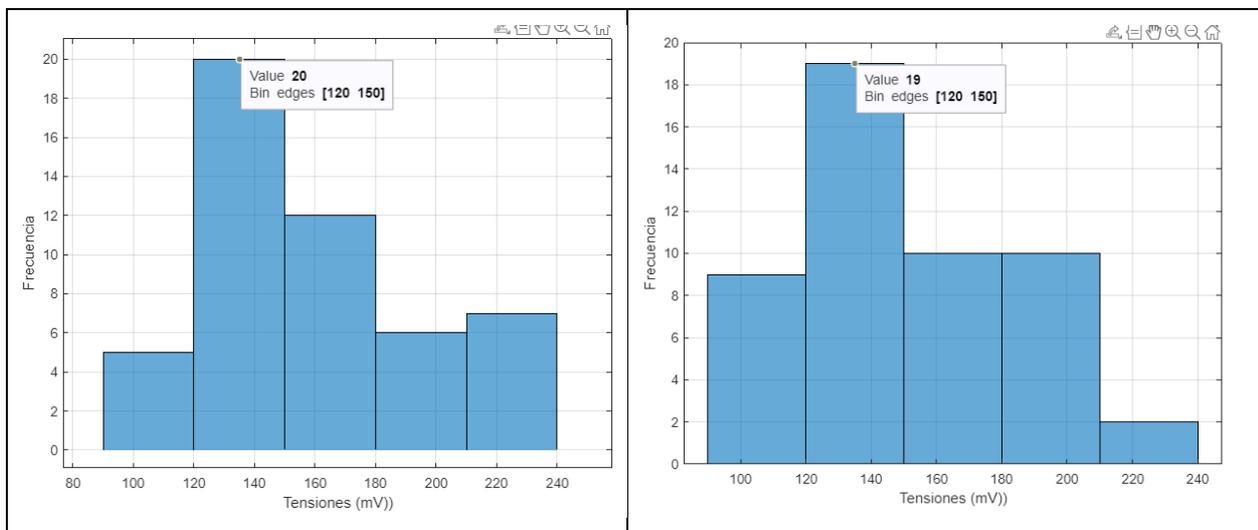


Figura 7-23 Gráfica de los datos recogidos en este ensayo.

En contraste con la gráfica anterior, en esta nueva representación se observa un comportamiento diferente, ya que las tensiones disminuyen a medida que se toman más muestras. Esta variación puede atribuirse a que el sensor, ubicado a una altura determinada y con un ángulo de inclinación específico, experimenta dificultades para mantener las tensiones estables a medida que transcurre el tiempo.

El descenso gradual de las tensiones sugiere que el sensor enfrenta desafíos para mantener una medición consistente y estable a lo largo del tiempo. Es posible que la altura y el ángulo de inclinación influyan en la precisión y estabilidad de las tensiones registradas, lo que se refleja en la disminución gradual observada en la gráfica.

Es relevante señalar que en cada una de las representaciones gráficas, se puede apreciar una convergencia predominante de las tensiones en los diferentes sectores hacia los siguientes valores predominantes:



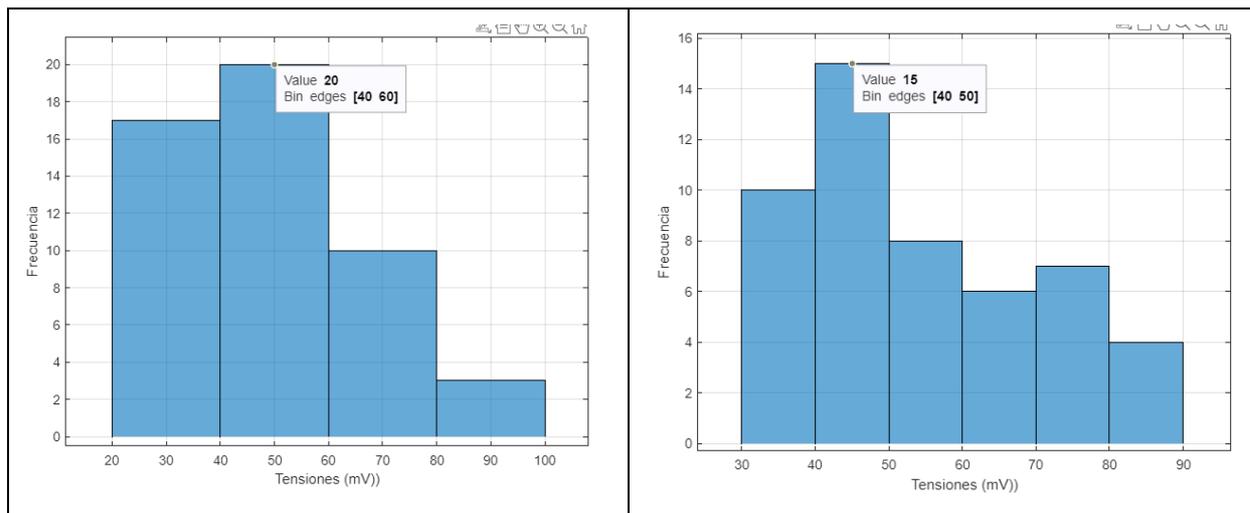


Figura 7-24 Histograma de tensiones del ensayo 7.6 a 22 cm

Con el propósito de validar la veracidad de estos valores, es necesario que en esta prueba el ángulo de incidencia solar se acerque a los 45°. Teniendo en cuenta que el ángulo y se aproxima a 0°, podemos concluir que el ángulo de incidencia solar es igual al ángulo de proyección en el eje x.

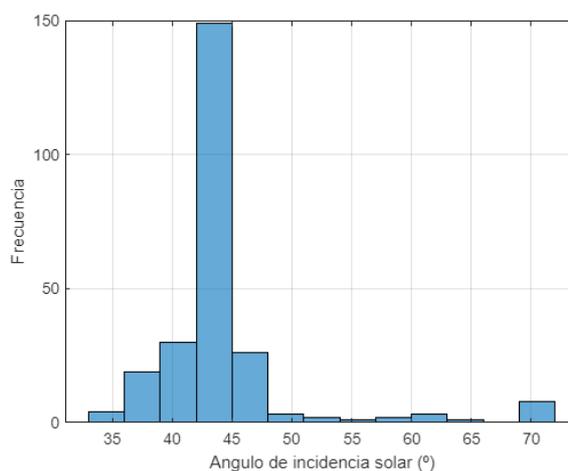


Figura 7-25 Histograma del ensayo 7.6.

7.7 ENSAYO X=0° Y=45°

- A 10 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

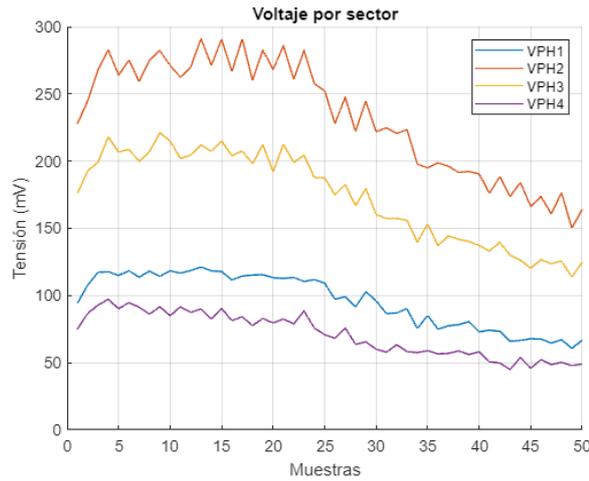
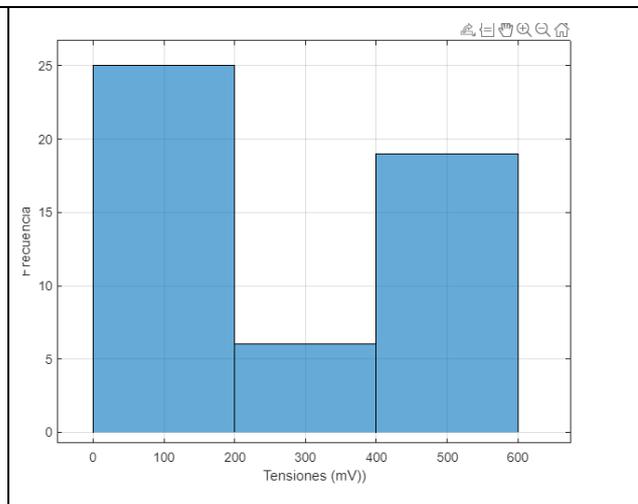
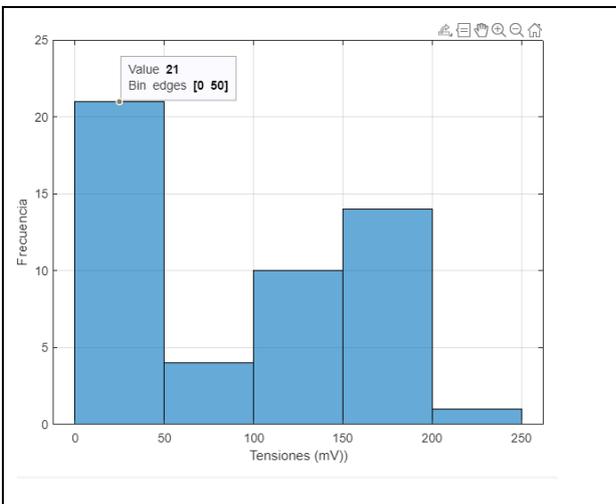


Figura 7-26 Datos recogidos en el ensayo.

La nueva representación exhibe un patrón distinto en el cual las tensiones decrecen a medida que se obtienen más muestras. Este fenómeno podría atribuirse a las dificultades que experimenta el sensor situado a una altura específica y con un ángulo de inclinación determinado para mantener las tensiones de manera estable a lo largo del tiempo.

La disminución gradual de las tensiones indica que el sensor se enfrenta a desafíos al intentar mantener mediciones consistentes y estables a medida que transcurre el tiempo. Es probable que la altura y el ángulo de inclinación influyan en la precisión y estabilidad de las tensiones registradas, lo cual se refleja en el patrón de decrecimiento observado en la gráfica.

Es pertinente destacar que en cada una de las representaciones gráficas se puede apreciar una tendencia predominante de convergencia de las tensiones en los distintos sectores hacia los siguientes valores predominantes:



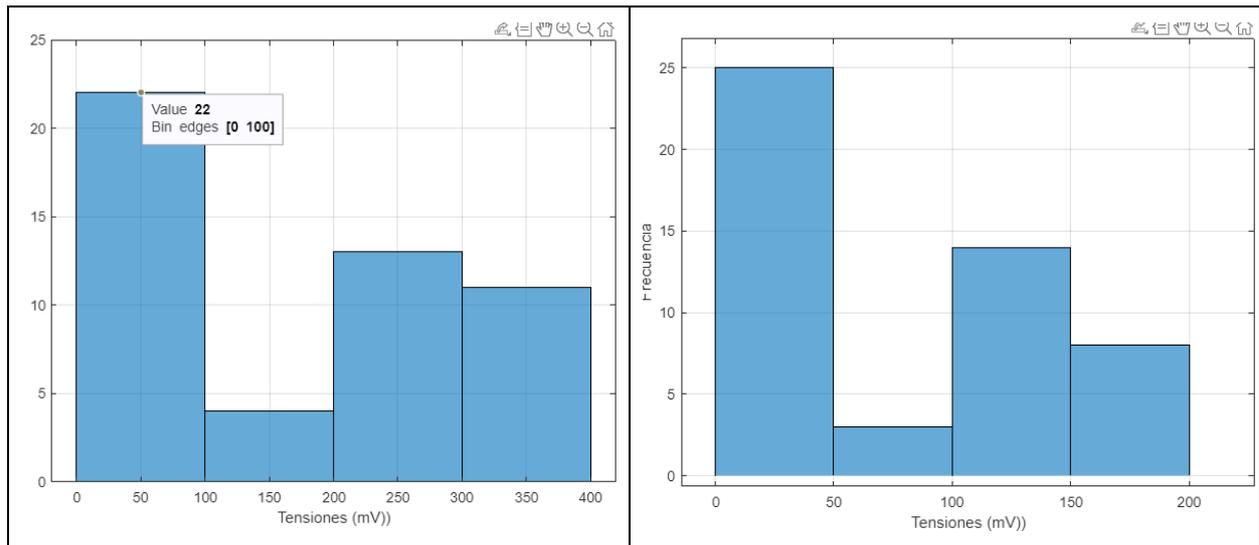


Figura 7-27 Histograma de tensiones del ensayo 7.7 a 10 cm

- A 22 cm:

Para el siguiente ensayo recogemos los siguientes datos:

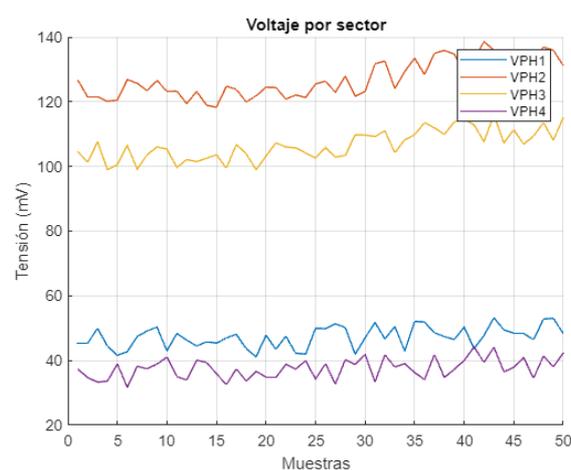


Figura 7-28 Gráfica de los datos recogidos en este ensayo.

En comparación con la gráfica anterior, en esta nueva representación se observa un comportamiento más estable, donde las tensiones se mantienen de manera más constante en el tiempo. Este patrón indica una mejora en la calidad de las mediciones.

Un factor importante que influye en esta mayor estabilidad es la precisión en la medición del ángulo de incidencia solar como se puede ver en la figura. En este caso, se ha logrado una mayor precisión en la medición, lo que contribuye a obtener resultados más consistentes.

Además, es relevante mencionar que en esta representación las tensiones son notablemente más pequeñas en comparación con la altura anterior. Esto sugiere que, a esta altura y ángulo en particular, las tensiones tienden a ser más reducidas.

Es relevante señalar que en cada una de las representaciones gráficas, se puede observar una convergencia predominante de las tensiones en los diferentes sectores hacia los siguientes valores predominantes:

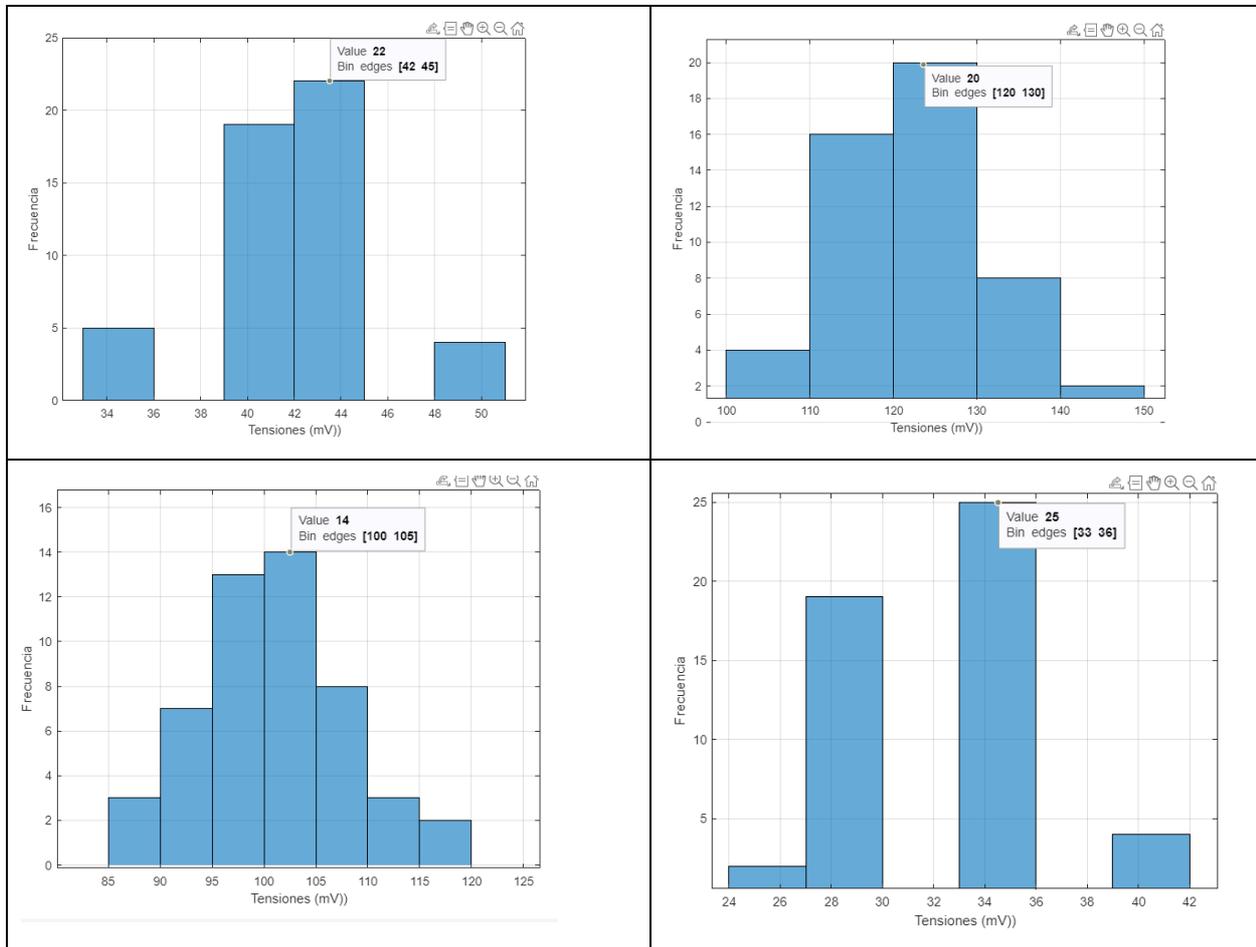


Figura 7-29 Histograma del ensayo 7.7 a 22 cm

Para validar la precisión de estos valores, en esta prueba se requiere que el ángulo de incidencia solar se aproxime a los 45° . Al observar que el *ángulo* y se acerca a 0° , se puede concluir que el ángulo de incidencia solar es igual al ángulo de proyección en el eje x.

Como comentábamos anteriormente, la calidad de esta medida fue mejor:

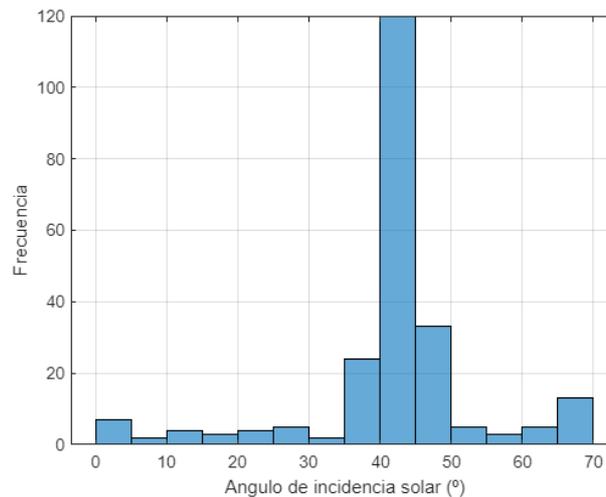


Figura 7-30 Histograma del ensayo 7.7.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que a medida que la distancia entre el sensor y la fuente de luz aumentaba, las tensiones de entrada del sensor tendían a disminuir. Esta disminución de las tensiones sugiere que el sensor percibe una menor intensidad lumínica a medida que se aleja de la fuente de luz.

En cuanto a la medida del ángulo de incidencia solar, se puede inferir que a distancias mayores, el sensor puede tener dificultades para captar con precisión la posición exacta de la fuente de luz y, por lo tanto, la proyección del ángulo de incidencia solar. Esto puede deberse a la dispersión de la luz y a posibles interferencias o atenuaciones que ocurren a medida que la luz viaja desde la fuente hasta el sensor.

En consecuencia, se puede concluir que la distancia entre el sensor y la fuente de luz puede tener un impacto en la precisión y estabilidad de las mediciones del ángulo de incidencia solar. A distancias mayores, es posible que las mediciones sean menos precisas y más variables, lo que podría requerir ajustes adicionales en el sistema de medición o la implementación de técnicas de calibración para mejorar la exactitud de los resultados.

8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo, se llevó a cabo el estudio y caracterización del sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c, así como el desarrollo de un sistema de caracterización rápida utilizando un Arduino Uno. A lo largo del proyecto, se siguieron diferentes etapas de metodología que incluyeron una revisión bibliográfica, el diseño e implementación del sistema, el desarrollo de algoritmos, la realización de pruebas experimentales y la evaluación de los resultados obtenidos.

Durante las pruebas experimentales, se realizaron mediciones en diferentes configuraciones y escenarios, obteniendo datos de tensión de entrada del sensor en función de las proyecciones del ángulo de incidencia solar. Se diseñó un soporte personalizado que permitió controlar la iluminación del entorno de prueba de manera precisa, minimizando la influencia de la luz solar no deseada y asegurando mediciones más exactas y confiables.

Se observó que el sensor era altamente sensible a las perturbaciones y que requería cierto tiempo de adaptación para obtener mediciones estables y precisas. Se encontró una correlación entre las tensiones de entrada y las proyecciones del ángulo de incidencia solar, y se identificaron rangos predominantes de tensión para cada uno de los sectores del sensor en diferentes configuraciones.

Las pruebas realizadas permitieron validar la funcionalidad y precisión del sistema de caracterización rápida desarrollado. Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones y áreas de mejora. Por ejemplo, se observó que las mediciones eran más estables a distancias cortas y ángulos pequeños, mientras que a distancias mayores y ángulos más pronunciados, las tensiones tendían a ser más variables y menos precisas. Estas limitaciones podrían abordarse mediante ajustes en la configuración del sistema o mediante la implementación de técnicas de calibración y corrección de errores.

En cuanto a las líneas futuras de investigación, se sugiere explorar la posibilidad de utilizar técnicas de machine learning para mejorar la precisión y estabilidad de las mediciones del sensor solar. Esto podría implicar el desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático que utilicen los datos recopilados para entrenar modelos capaces de predecir con mayor precisión las proyecciones del ángulo de incidencia solar a partir de las tensiones de entrada del sensor.

Además, se podría investigar la aplicación del sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c en otros campos y escenarios, como la navegación espacial, la monitorización de paneles solares o la optimización de sistemas de seguimiento solar. Estas aplicaciones podrían requerir adaptaciones adicionales del sistema de caracterización rápida y la implementación de protocolos de comunicación y control específicos.

En resumen, este TFG ha contribuido al estudio y caracterización del sensor solar Sun Sensor NANO-ISSX/c, así como al desarrollo de un sistema de caracterización rápida basado en un Arduino Uno. Se han obtenido resultados prometedores, pero también se han identificado áreas de mejora y líneas futuras de investigación. El trabajo realizado sienta las bases para futuros avances en el campo de la medición y caracterización de sensores solares, con posibles aplicaciones en diversos ámbitos.

REFERENCIAS

- [1] «Sistemas de seguimiento solar,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.energiasolar.lat/sistemas-de-seguimiento-solar/>.
- [2] C. S. Borja, «Comparación de sensores basados en celdas solares y fotodiodos para la determinación de la orientación de satélites CubeSat,» 2019. [En línea]. Available: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1689/1/SolisBC.pdf>.
- [3] «Sondas y Satélites,» [En línea]. Available: <https://sondasysatelites.blogspot.com/2006/09/sistema-de-determinacin-y-control-de.html?m=1>.
- [4] SectorElectricidad, «Ángulos Solares y su importancia para el diseño de Sistemas Fotovoltaicos,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.sectorelectricidad.com/36130/angulos-solares-y-su-importancia-para-el-diseno-de-sistemas-fotovoltaicos/>.
- [5] G. Absolute, «Diferentes usos de los sensores solares,» 2021, [En línea]. Available: <https://www.solar-mems.com/diferentes-usos-de-los-sensores-solares/>.
- [6] N. Márquez, «Diseño de un entorno gráfico para visualizar,» 2022. [En línea]. Available: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/140471/1/TFG4039_Marquez%20Pino.pdf?sequence=1.
- [7] M. Á. Pérez, «Nanocables, una tecnología para crear paneles solares más eficientes,» 2013. [En línea]. Available: <https://blogthinkbig.com/nanocables-paneles-solares>.
- [8] J. R. Guerrero, «Sistema de calibración de un sensor solar de cuatro cuadrantes,» 2022. [En línea]. Available: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/140532/TFG4065_Reyes%20Guerrero.pdf?isAllowed=y&sequence=1.
- [9] «Normalización y calibración de sensores de radiación,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/normalizacion-y-calibracion-de-sensores-de-radiacion>.
- [10] «SENSOR SEGUIDOR SOLAR UN SOLO EJE HD-36,» [En línea]. Available: <https://cdtecnologia.net/sensores/1143-sensor-seguidor-solar-un-solo-eje-hd-36.html>.
- [11] P. ZUBRINICH, «Nueva tecnología con sistema óptico de energía solar transforma el aspecto económico en esta industria,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2020/07/20/nueva-tecnologia-con-sistema-optico-de-energia-solar-transforma-el-aspecto-economico-en-esta-industria/>.
- [12] «Técnica de medición para sistemas de seguimiento del sol,» [En línea]. Available: <https://www.siko-global.com/es-ec/industrias-soluciones/sun-tracking>.
- [13] J. A. L. BARDALLO, «Sensor solar y Método para detectar la posición del sol respecto al eje transversal del mismo,» [En línea]. Available: <https://produccioncientifica.uca.es/patentes/P201601091>.

- [14 «Celda Solar Graetzel,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Celda_Solar_Graetzel.
]
- [15 A. Padilla-Romero, «Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para Aumentar el Rendimiento,»
] 2022. [En línea].
- [16 «Sistemas de seguimiento en centrales fotovoltaicas,» [En línea]. Available: <https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/15353.htm>.
]
- [17 «¿Cómo orientar e inclinar mi instalación fotovoltaica?,» 2023. [En línea]. Available:
] <https://tarifasgasluz.com/autoconsumo/instalacion/inclinacion-y-orientacion>.
- [18 «SEGUIDOR SOLAR,» [En línea]. Available: <https://energiasolarfotovoltaica.org/seguidor-solar>.
]
- [19 «¿Qué es el sistema de seguimieno solar?,» 2021. [En línea]. Available:
] https://es.xmkseng.com/blog/what-is-the-solar-tracker-system_b36.
- [20 «Estaciones Meteorológicas para Plantas Solares,» 2022. [En línea]. Available:
] <https://www.sevensensor.com/es/estaciones-meteorologicas-para-plantas-solares>.
- [21 «Evaluación del recurso solar,» [En línea]. Available:
] https://seslab.org/fotovoltaico/312_evaluacin_del_recurso_solar.html.
- [22 «¿Cómo se puede optimizar el rendimiento de un sistema fotovoltaico?,» [En línea]. Available:
] <https://comercialfoisa.com/como-se-puede-optimizar-el-rendimiento-de-un-sistema-fotovoltaico/>.
- [23 «Centrales de energía térmica solar,» [En línea]. Available: <https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/15355.htm>.
]
- [24 «LED de alta eficiencia energética y láseres con monocapas de calcogenuro,» 2014. [En línea]. Available:
] <https://smart-lighting.es/led-de-alta-eficiencia-energetica-y-laseres-con-monocapas-de-calcogenuro/>.
- [25 «Control inteligente de tu energía solar: IOT aplicado a paneles solares híbridos,» 2018. [En línea].
] Available: <https://www.casadomo.com/comunicaciones/comunicacion-control-inteligente-energia-solar-iot-aplicado-paneles-solares-hibridos>.
- [26 «Quantum,» [En línea]. Available: <https://commercial.lutron.com/mx/es/whole-building-systems/quantum>.
]
- [27 «TrinaTracker apuesta por la integración de la inteligencia artificial en el sector solar,» 2022. [En línea].
] Available: <https://news.cision.com/global/trinatracker/tr/trinatracker-apuesta-por-la-integracion-de-la-inteligencia-artificial-en-el-sector-solar,c3590502>.
- [28 «Sun Sensor NANO-ISSX/c,» [En línea]. Available: [solar-mems.com/smt_pdf/NANO_Technical_Specifications.pdf](https://www.solar-mems.com/smt_pdf/NANO_Technical_Specifications.pdf).
]
- [29 «Arduino.cc,» [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>.
]
- [30 G. Pérez, «Tutorial Arduino: Entradas Analógicas y Digitales,» 2015. [En línea].
]

- [31] J. PENALVA, «13 proyectos asombrosos con Arduino para ponerte a prueba y pasar un gran rato,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/makers/13-proyectos-asombrosos-con-arduino-para-ponerte-a-prueba-y-pasar-un-gran-rato>.
- [32] L. d. V. Hernández, «Pines digitales de Arduino pinMode, digitalWrite y digitalRead,» [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/pines-digitales-de-arduino/>.
- [33] «Teclado Matricial 4×4,» [En línea]. Available: <https://electronicamade.com/teclado-matricial-4x4/>.
- [34] «Explicación y aplicación con LCD 16x2 y del teclado matricial 4x4 con Arduino,» 2021. [En línea]. Available: https://electronfer.wixsite.com/electronica/post/uso_lcd_keypad_arduino.
- [35] «TECLADOS MATRICIALES,» [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/teclados-matriciales/>.
- [36] «HETPRO,» [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/teclado-matricial-con-arduino/>.
- [37] «Universidad Autónoma de Querétaro,» [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-de-queretaro/programacion-avanzada/practica-03/57519001>.
- [38] «www.mechatronicstore.cl,» [En línea]. Available: <https://www.mechatronicstore.cl/pantalla-lcd1602/>.
- [39] «Interface an I2C LCD with Arduino,» [En línea]. Available: <https://lastminuteengineers.com/i2c-lcd-arduino-tutorial/>.
- [40] N. Zambetti, «arduino.cc,» 2023. [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire>.
- [41] «arduino.cc LiquidCrystal I2C,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/liquidcrystal-i2c/>.
- [42] «Resistor 10K Ohm 1/4 Watt PTH - 20 pack (Thick Leads),» [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/14491>.
- [43] «Resistive Sensors and Pull Down Resistors,» [En línea]. Available: <https://diotlabs.daraghbyrne.me/docs/working-with-sensors/pull-down-resistors/>.
- [44] «Placa de pruebas,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Placa_de_pruebas.
- [45] «Aprendiendo Arduino,» [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/09/alimentacion-arduino/>.
- [46] «Alimentar el Arduino: La guía definitiva,» [En línea]. Available: <https://www.geekfactory.mx/tutoriales-arduino/alimentar-el-arduino-la-guia-definitiva/>.
- [47] «Librerías Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/>.

[48 O. Autor, «Otra cita distinta,» *revista*, p. 12, 2001.
]

ANEXO

Anexo 1: Código completo en Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h>
#include <math.h>

// Definir pines de los fotodiodos del sensor solar
const int VPH1_pin = A2;
const int VPH2_pin = A3;
const int VPH3_pin = A0;
const int VPH4_pin = A1;

unsigned long previousMillis = 0; // Variable para almacenar el tiempo anterior
const unsigned long interval = 10;

// Definir pines de la pantalla LCD
const int SDA_pin = A4;
const int SCL_pin = A5;

// Definir teclado 4x4
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {9, 8, 7, 6};
byte colPins[COLS] = {5, 4, 3, 2};

// Crear objeto para el control de la pantalla LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2);

// Crear objeto para el teclado
Keypad keypad = Keypad(makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);

void setup() {
  // Inicializar comunicación I2C con la pantalla LCD
  Wire.begin();
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  // Definir pines del sensor solar como entradas
```

```

pinMode(VPH1_pin, INPUT);
pinMode(VPH2_pin, INPUT);
pinMode(VPH3_pin, INPUT);
pinMode(VPH4_pin, INPUT);

lcd.clear();
lcd.print("Bienvenido");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Presione tecla");
}

char previousKey = NO_KEY;
unsigned long lastKeyPresTime = 0;

void loop() {
    // Leer tensiones de los fotodiodos del sensor solar
    float VPH1 = analogRead(VPH1_pin) * (5000.0 / 1023.0);
    float VPH2 = analogRead(VPH2_pin) * (5000.0 / 1023.0);
    float VPH3 = analogRead(VPH3_pin) * (5000.0 / 1023.0);
    float VPH4 = analogRead(VPH4_pin) * (5000.0 / 1023.0);

    // Calcular ángulos X e Y de la incidencia del rayo sola
    float X1 = VPH3 + VPH4;
    float X2 = VPH1 + VPH2;
    float FX = (X2 - X1) / (X2 + X1);
    float ANGLE_X = atan2(C * FX, 1) * (180 / M_PI);

    float Y1 = VPH1 + VPH4;
    float Y2 = VPH2 + VPH3;
    float FY = (Y2 - Y1) / (Y2 + Y1);
    float ANGLE_Y = atan2(C * FY, 1) * (180 / M_PI);

    // Calcular ángulo  $\alpha$ 
    float ALPHA = atan2(sqrt(tan(ANGLE_X * (M_PI / 180)) * tan(ANGLE_X * (M_PI / 180)) + tan(ANGLE_Y * (M_PI / 180)) * tan(ANGLE_Y * (M_PI / 180))), 1) * (180 / M_PI);

    // Leer tecla pulsada en el teclado
    char key = keypad.getKey();

    // Mostrar valores en la pantalla LCD según la tecla pulsada
    if (key != NO_KEY) {
        // Si se pulsó una tecla diferente, mostrar su valor inmediatamente
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);

        if (key == '1') {
            if (VPH1 >= 1000) {
                lcd.print("VPH1: ");
            }
        }
    }
}

```

```

    lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V    ");
} else {
    lcd.print("VPH1: ");
    lcd.print(VPH1, 2);
    lcd.print(" mV    ");
}
} else if (key == '2') {
    if (VPH2 >= 1000) {
        lcd.print("VPH2: ");
        lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V    ");
    } else {
        lcd.print("VPH2: ");
        lcd.print(VPH2, 2);
        lcd.print(" mV    ");
    }
} else if (key == '3') {
    if (VPH3 >= 1000) {
        lcd.print("VPH3: ");
        lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V    ");
    } else {
        lcd.print("VPH3: ");
        lcd.print(VPH3, 2);
        lcd.print(" mV    ");
    }
} else if (key == '4') {
    if (VPH4 >= 1000) {
        lcd.print("VPH4: ");
        lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V    ");
    } else {
        lcd.print("VPH4: ");
        lcd.print(VPH4, 2);
        lcd.print(" mV    ");
    }
} else if (key == 'A') {
    lcd.print("ANGLE_X: ");
    lcd.print(ANGLE_X);
} else if (key == 'B') {
    lcd.print("ANGLE_Y: ");
    lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (key == '5') {
    if (VPH1 >= 1000) {
        lcd.print("1: ");
        lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
        lcd.print(" V");
    }
}

```

```

} else {
    lcd.print("1: ");
    lcd.print(VPH1, 2);
}
if (VPH3 >= 1000) {
    lcd.print("3: ");
    lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("3: ");
    lcd.print(VPH3, 2);
}
lcd.setCursor(0, 1);
if (VPH2 >= 1000) {
    lcd.print("2: ");
    lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("2: ");
    lcd.print(VPH2, 2);
}
if (VPH4 >= 1000) {
    lcd.print("4: ");
    lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("4: ");
    lcd.print(VPH4, 2);
}
} else if (key == '6') {
    lcd.print("ANGLE_X: ");
    lcd.print(ANGLE_X);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("ANGLE_Y: ");
    lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (key == '7') {
    lcd.print("SUN_RAY: ");
    lcd.print(ALPHA);
}

// Almacenar la tecla pulsada actual como la tecla anterior
previousKey = key;
lastKeyPressTime = millis();
} else {
    // Si no se pulsó ninguna tecla diferente, actualizar la última tecla pulsada
    cada medio segundo
    if (millis() - lastKeyPressTime >= interval) {
        lcd.setCursor(0, 0);
    }
}

```

```
if (previousKey == '1') {
  if (VPH1 >= 1000) {
    lcd.print("VPH1: ");
    lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V    ");
  } else {
    lcd.print("VPH1: ");
    lcd.print(VPH1, 2);
    lcd.print(" mV   ");
  }
} else if (previousKey == '2') {
  if (VPH2 >= 1000) {
    lcd.print("VPH2: ");
    lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V    ");
  } else {
    lcd.print("VPH2: ");
    lcd.print(VPH2, 2);
    lcd.print(" mV   ");
  }
} else if (previousKey == '3') {
  if (VPH3 >= 1000) {
    lcd.print("VPH3: ");
    lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V    ");
  } else {
    lcd.print("VPH3: ");
    lcd.print(VPH3, 2);
    lcd.print(" mV   ");
  }
} else if (previousKey == '4') {
  if (VPH4 >= 1000) {
    lcd.print("VPH4: ");
    lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V    ");
  } else {
    lcd.print("VPH4: ");
    lcd.print(VPH4, 2);
    lcd.print(" mV   ");
  }
} else if (previousKey == 'A') {
  lcd.print("ANGLE_X: ");
  lcd.print(ANGLE_X);
} else if (previousKey == 'B') {
  lcd.print("ANGLE_Y: ");
  lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (previousKey == '5') {
  if (VPH1 >= 1000) {
    lcd.print("1:");
  }
}
```

```
    lcd.print(VPH1 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("1:");
    lcd.print(VPH1, 2);
    lcd.print(" ");
}
if (VPH3 >= 1000) {
    lcd.print("3:");
    lcd.print(VPH3 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("3:");
    lcd.print(VPH3, 2);
}
lcd.setCursor(0, 1);
if (VPH2 >= 1000) {
    lcd.print("2:");
    lcd.print(VPH2 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("2:");
    lcd.print(VPH2, 2);
    lcd.print(" ");
}
if (VPH4 >= 1000) {
    lcd.print("4:");
    lcd.print(VPH4 / 1000.0, 2);
    lcd.print(" V");
} else {
    lcd.print("4:");
    lcd.print(VPH4, 2);
}
} else if (previousKey == '6') {
    lcd.print("ANGLE_X: ");
    lcd.print(ANGLE_X);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("ANGLE_Y: ");
    lcd.print(ANGLE_Y);
} else if (previousKey == '7') {
    lcd.print("SUN_RAY: ");
    lcd.print(ALPHA);
}

lastKeyPressTime = millis();
}
}
```

```
delay(100);  
}
```

Anexo 2: Datasheet del Sensor NANO-ISSX/c

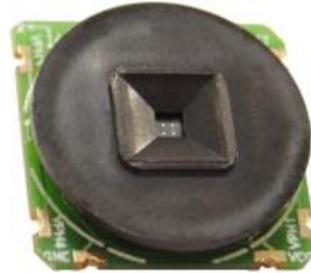
NANO-ISSX
Technical Specifications

Page: 1 of 8
 Version: 1.04

Solar MEMS Technologies S.L.

Sun Sensor NANO-ISSX/c

Technical Specifications



Features

Two orthogonal axes sun sensor
Different fields of view version: 60, 25, 15 and 5
Low power consumption: 5 mW
Wide operating voltage range: 3,3÷12 V
Industrial temperature range: - 40° to 85°C
Compact design: 18×18×3,85 mm (L×W×H)
Low weight: < 5 g
Surface mountable

Applications

Renewable energies
Automotive
Air conditioning systems
Domotic applications
Attitude control systems for vehicles
Sun tracking

NANO-ISSX sun sensor allows the measurement of the sun ray incident vector by providing its projection angles in orthogonal reference axes by means of a simple calculation procedure.

The field of view is achieved by the geometrical dimensions of the design. Its compact pattern, ease integration and low power consumption, makes it a suitable tool for renewable energies or low cost intelligent sensing applications.

NANO-ISSX is available in two formats: one designed for PCB surface mounting and one with a disconnectable type wire-to-board crimp style connector (NANO-ISSX-c).

1. Specifications

1.1. General Specifications

Parameter	NANO-60	NANO-25	NANO-15	NANO-5	Unit
Sensor type	2 axes	2 axes	2 axes	2 axes	Orthogonal
Field of view (FOV)	120x120	50x50	30x30	10x10	°
Average consumption	5	5	5	5	mW
Dimensions (L×W×H)	18×18×3,85	18×18×5,15	18×18×6,35	18×18×10,15	mm
Weight	<10	<10	<10	<10	g

Table 1. General Specifications

1.2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Minimum value	Maximum value	Unit
VDD	Supply voltage	0	14	V
TOP	Operating temperature	-40	85	°C

Table 2. Absolute maximum ratings

1.3. Recommended operating conditions

Symbol	Parameter	Minimum value	Maximum value	Unit
VDD	Supply voltage	3	12	V
Vr	Supply voltage ripple	0	100	mVpp
TOP	Operating temperature	-40	85	°C

Table 3. Recommended operation conditions

2. Sun Sensor NANO-ISSX

NANO-ISSX measures the incidence angles of a sun ray based on a quadrant photodetector device. The sunlight is guided to the detector through a window above the sensor. Depending on the angle of incidence, the sunlight induces photocurrents in the four quadrants of the detector.

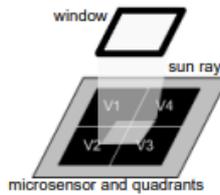


Fig 1. Microsensor of NANO-ISSX

2.1. NANO-ISSX parameters

2.1.1. Reference Axes

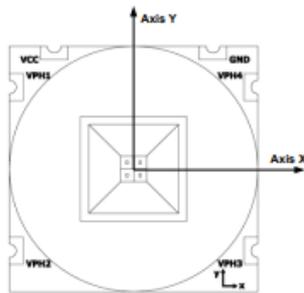


Fig 2. Front view NANO-ISS60 reference system

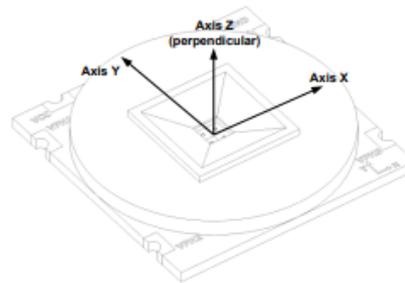


Fig 3. Isometric view NANO-ISS60 reference system

Z axis is perpendicular to the sensor base plane.

2.1.2. Incident angle calculation

The *angle x* and *angle y* specify the angular position of the incident sun ray inside the field of view of the NANO-ISSX sensor according to references given in Fig. 5.

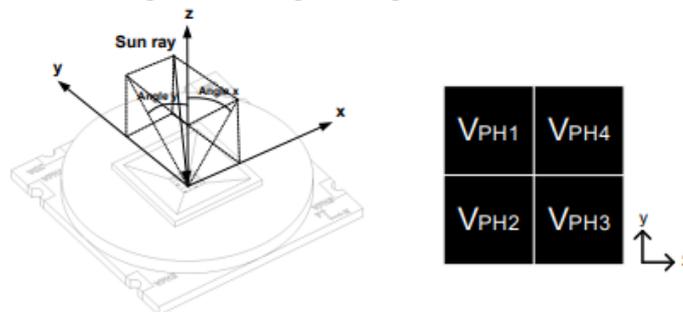


Fig 4. Reference for angles calculation

Angles X and Y of the incidence ray can be obtained with a simple set of equations involving the four photodiode voltages generated by the sensor (V_{PH1} , V_{PH2} , V_{PH3} , V_{PH4}):

$$X_1 = V_{PH3} + V_{PH4}$$

$$X_2 = V_{PH1} + V_{PH2}$$

$$F_X = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1}$$

$$\text{Angle } X = \arctg(C \cdot F_X)$$

$$Y_1 = V_{PH1} + V_{PH4}$$

$$Y_2 = V_{PH2} + V_{PH3}$$

$$F_Y = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1}$$

$$\text{Angle } Y = \arctg(C \cdot F_Y)$$

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

Table 4. Values of the parameter C according to the type of sensor NANO-ISSX

The accuracy of the measurements depends on the integration and the calibration processes. The NANO-ISSX sun sensors are not calibrated.

3. Electrical interface

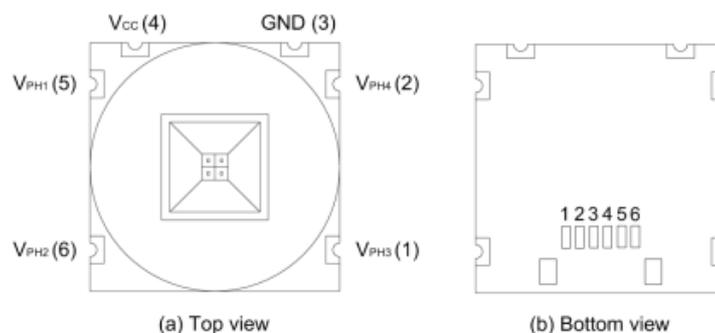


Fig 5. NANO-ISSX pin configuration

Pin	Symbol	Description
1	V_{PH3}	Lower-right photodiode voltage (3)
2	V_{PH4}	Upper-right photodiode voltage (4)
3	GND	Ground
4	V_{cc}	Power supply
5	V_{PH1}	Upper-left photodiode voltage (1)
6	V_{PH2}	Lower-left photodiode voltage (2)

Table 5. Pin description

4. Mechanical drawings

4.1. NANO-ISS60

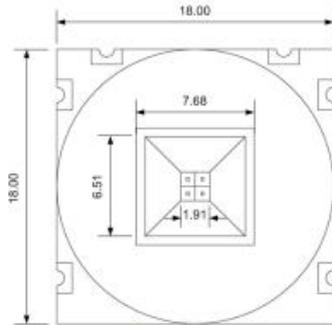


Fig 6. Top view

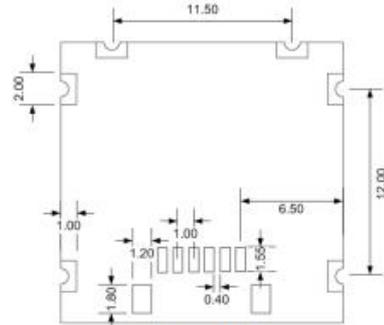


Fig 7. Bottom view



Fig 8. Side view

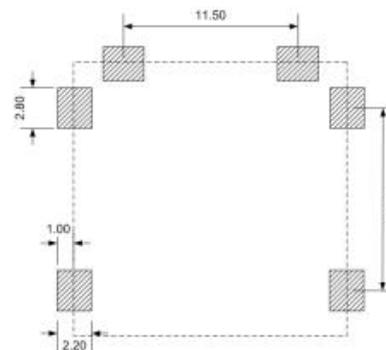
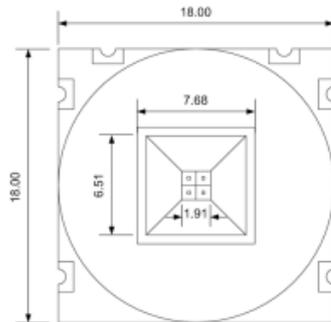
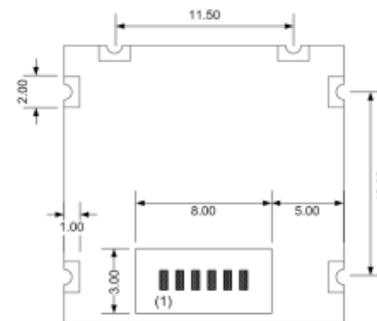
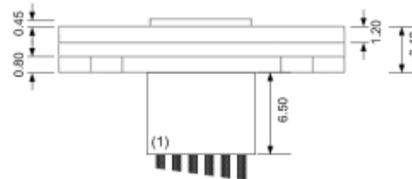


Fig 9. Recommended land pattern

- Notes: (a) Dimensions are in millimetres.
 (b) Tolerances are non-cumulative: ± 0.05 mm for all centers.
 (c) The dimensions above should serve as a guideline. Contact Solar MEMS Technologies for details.

Dimensions of NANO-ISS25, NANO-ISS15 and NANO-ISS5 versions are the same as NANO-ISS60 except height. See table 1.

4.2. NANO-ISS60-c

Fig 10. Top view

Fig 11. Bottom view

Fig 12. Side view

- Notes: (a) Dimensions are in millimetres.
 (b) Tolerances are non-cumulative: ± 0.05 mm for all centers.
 (c) The dimensions above should serve as a guideline. Contact Solar MEMS Technologies for details.
 (d) SH connector supplied is wire-to-board 1 mm pinch crimp style.

Dimensions of NANO-ISS25, NANO-ISS15 and NANO-ISS5 versions are the same as NANO-ISS60 except height. See table 1.

5. Warranty

Solar MEMS Technologies S.L. warrants the NANO-ISSX sun sensor to the original consumer purchaser any product that is determined to be defective for the following terms will be repaired, or replaced.

The warranty is one year from date of purchase.

The product in question must be sent to Solar MEMS Technologies S.L. (address is shown below) within the warranty period and the original consumer purchaser must comply with the following conditions, to be eligible for repair or replacement under this warranty:

- The product must not have been modified or altered in any way by an unauthorized source.
- The product must have been installed in accordance with the installation instructions and the technical specifications.

This limited warranty does not cover:

- Damage due to improper installation;
- Accidental or intentional damages;
- Misuse, abuse, corrosion, or neglect;
- Product impaired by severe conditions, such as excessive wind, ice, storms, lightning strikes or other natural occurrences;
- Damage due to improper packaging on return shipment.

Any and all labor charges for troubleshooting, removal or replacement of the product are not covered by this warranty and will not be honored by Solar MEMS Technologies S.L.

Return shipping to Solar MEMS Technologies S.L. must be pre-paid by the original consumer purchaser. Solar MEMS Technologies S.L. will pay the normal return shipping charges to original consumer purchaser within the European Union countries only.

Address of Solar MEMS Technologies S.L.

Solar MEMS Technologies S.L.
 Parque Científico Tecnológico Cartuja 93.
 Tecnoincubadora Marie Curie.
 C/ Leonardo da Vinci 18, Planta 1, Módulo 2.
 C.P. 41092, Seville, Spain.
 E-mail: smt@solar-mems.com
 Phone: (+34) 954 460 113



Solar MEMS has a system of quality and environment according to the ISO 9001 and ISO 14001 standards, provided by the certification company Applus CTC.

Anexo 3: Código Python para el archivo de datos.

```
import serial
import xlwt
```

```

from datetime import datetime
import signal
import sys

class SerialToExcel:
    def __init__(self, port, speed):
        self.port = port
        self.speed = speed

        self.wb = xlwt.Workbook()
        self.ws = self.wb.add_sheet("Data from Serial", cell_overwrite_ok=True)
        self.columns = ["Date Time"]
        self.number = 100
        self.stop_reading = False

    def setColumns(self, col):
        self.columns.extend(col)

    def setRecordsNumber(self, number):
        self.number = number

    def readPort(self):
        ser = serial.Serial(self.port, self.speed, timeout=1)
        c = 0
        for col in self.columns:
            self.ws.write(0, c, col)
            c = c + 1
        self.fila = 1
        i = 0
        while i < self.number and not self.stop_reading:
            line = str(ser.readline().decode('utf-8'))
            if len(line) > 0:
                now = datetime.now()
                date_time = now.strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S")
                print(date_time, line)
                if line.find(","):
                    c = 1
                    self.ws.write(self.fila, 0, date_time)
                    columnas = line.split(",")
                    for col in columnas:
                        col = col.strip().rstrip(";")
                        self.ws.write(self.fila, c, col)
                        c = c + 1
                    i = i + 1
                self.fila = self.fila + 1

    def stopReading(self):
        self.stop_reading = True

    def writeFile(self, archivo):
        self.wb.save(archivo)

def signal_handler(signal, frame):
    serialToExcel.stopReading()
    serialToExcel.writeFile("archivo1.xls")
    sys.exit(0)

```

```

serialToExcel = SerialToExcel("COM7", 9600)

columnas = ["t250ms", "S1", "S2", "S3", "S4"]

serialToExcel.setColumns(columnas)
serialToExcel.setRecordsNumber(2000)

signal.signal(signal.SIGINT, signal_handler)

serialToExcel.readPort()
serialToExcel.writeFile("archivo1.xls")

```

Anexo 4: Código Matlab para extracción de resultados

```

classdef DataClass
    properties (SetAccess = public)
        myTable % Propiedad para almacenar la tabla
        ensayos = -1*ones(50,11,45);
    end

    variables=["t250ms","xEnsayo","yEnsayo","alturaEnsayo","VPH1","VPH2","VPH3","VPH4","ANGLE_X","ANGLE_Y","ALPHA"];
    end

    methods
        % Constructor de la clase
        function obj = DataClass(inputTable)
            % Verificar que el argumento sea una tabla
            if istable(inputTable)
                obj.myTable = inputTable;
                for i=1:45
                    obj.ensayos(:,:,i)=table2array(inputTable((i-1)*50+1:(i-1)*50+50,2:12));
                end
            else
                error('El argumento debe ser una tabla.');
```

```

    end

    T=array2table(obj.ensayos(:, :, k), 'VariableNames', obj.variables);
end

function graficaTensiones(obj, ens, y, h)
    if nargin < 3
        figure
        hold on
        plot([ens.VPH1 ens.VPH2 ens.VPH3 ens.VPH4])
        title("Voltaje por sector")
        ylabel("Tensión (mV)")
        xlabel("Muestras")
        legend(["VPH1", "VPH2", "VPH3", "VPH4",])
        grid on
    else
        ens=obj.getEnsayo(ens, y, h);
        figure
        plot([ens.VPH1 ens.VPH2 ens.VPH3 ens.VPH4])
        title("Voltaje por sector")
        ylabel("Tensión (mV)")
        xlabel("Muestras")
        legend(["VPH1", "VPH2", "VPH3", "VPH4",])
        grid on
    end
end

function l=limpiarEnsayo(~, e)
    l=e;
    a=22;
    l.VPH1=movmean(e.VPH1, a);
    l.VPH2=movmean(e.VPH2, a);
    l.VPH3=movmean(e.VPH3, a);
    l.VPH4=movmean(e.VPH4, a);

    amplitud=10;
    l.VPH1 = l.VPH1 + amplitud * rand(1, length(e.VPH1));
    l.VPH2 = l.VPH2 + amplitud * rand(1, length(e.VPH2));
    l.VPH3 = l.VPH3 + amplitud * rand(1, length(e.VPH3));
    l.VPH4 = l.VPH4 + amplitud * rand(1, length(e.VPH4));

end

function graficaHistograma(obj, ens, y, h, t)
    nargin

    if nargin < 5
        Tensiones = [ens.VPH1'; ens.VPH2' ;ens.VPH3'; ens.VPH4'; ens.ALPHA'];
        t=y;
    else
        ens=obj.getEnsayo(ens, y, h);
        Tensiones = [ens.VPH1'; ens.VPH2' ;ens.VPH3'; ens.VPH4'; ens.ALPHA'];
    end

    n=length(t);
    figure
    if(n>1)
        histogram(sum(Tensiones(t, :))/n)
    else

```

```
        histogram(Tensiones(t,:)/n)
    end
    ylabel("Frecuencia")
    %xlabel("Angulo de incidencia solar (°)")
    xlabel("Tensiones (mV)")
    grid on
end

end
end
```

