



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

**MONTAJE, OPTIMIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR DE DOS EJES
CON ALTA PRECISIÓN Y BAJO NIVEL DE RUIDO**

Tesis que presenta

MARIANA MONJARÁZ SALAS

En opción al título de

**GRADO MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA
RENOVABLE**

Mérida, Yucatán, México

2024



DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____



Mariana Monjaráz Salas

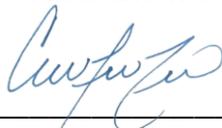
Mérida, Yucatán, México, a 8 de enero de 2024



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Mariana Monjaráz Salas** titulado **Montaje, optimización y caracterización de un sistema de seguimiento solar de dos ejes con alta precisión y bajo nivel de ruido** ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~ fue realizado en la Unidad de Energía Renovable, en la línea de Sistemas Híbridos, en el Laboratorio de Energías Renovables del Sureste (LENERSE) del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del **Dr. Luis David Patiño López**, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro y la codirección del **Dr. Manuel Ignacio Peña Cruz**, perteneciente al Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.

Atentamente



Dr. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 8 de enero de 2024

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por la beca otorgada N° 1134887 para la realización de esta investigación.

Al financiamiento recibido del proyecto CONACYT - SENER, por apoyar el proyecto 254667 “Consolidación del Laboratorio de Energía Renovable del Sureste (LENERSE)”, subproyecto SP2. Al financiamiento del CICY, por apoyar el proyecto FID-7019500001.

Al laboratorio de Sistemas Híbridos del LENERSE en la Unidad de Energía Renovables del Centro de Investigación Científica de Yucatán el Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, instalaciones donde se realizó el trabajo de investigación.

A mi director de Tesis, el Dr. Luis David Patiño López, por su orientación, apoyo y dedicación durante el proceso de investigación y redacción de la tesis.

A mi codirector de Tesis, el Dr. Manuel Ignacio Peña Cruz, por su orientación durante el desarrollo de esta investigación.

A mi comité tutorial: Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza, Dr. Ivan Rimmaudo, por su aportación con opiniones críticas y acertadas para el desarrollo de este trabajo. A mi revisor, el Dr. Romeli Barbosa Pool por sus observaciones.

Al M. C. Enrique Escobedo Hernández por su colaboración, apoyo y orientación en los procesos mecánicos, así como por su disposición para ayudar. Al Dr. Raúl Rodríguez García por su orientación y apoyo durante los desafíos técnicos.

A mis amigos, Michelle, Aurora, Andrés, Armando y Johan por su apoyo, consejos, pláticas sin sentido y las risas compartidas a lo largo de mi tiempo en la maestría. Su amistad y compañía convirtieron este periodo en una experiencia memorable, gratificante y muy significativa para mí.

DEDICATORIA

Para mi familia:

Mario.

Griselda.

Mario Jr.

Luis.

Gracias por todo su apoyo, los quiero
muchísimo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	4
1.1. Concentrador solar fotovoltaico (CPV)	5
1.2. Lente de Fresnel	11
1.3. Sistema de enfriamiento.....	12
1.4. Concentrador fotovoltaico térmico (CPVT)	13
1.5. Sistema de seguimiento	14
1.5.1. Subsistemas de seguimiento solar de un solo eje (1D)	15
1.5.2. Subsistema de seguimiento solar de dos ejes (2D).....	16
OBJETIVOS	26
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	27
2.1. Ensamblado	29
2.2. Optimización del sistema de seguimiento (Mecánica, Electrónica y de Código)	30
2.2.1. Circuito amplificador de transimpedancia	31
2.2.2. Pruebas de código de seguimiento y optimización de tiempo de iteración (<i>delay</i>)	34
2.2.3. Montaje	41
2.3. Calibración del paso mínimo de los motores a pasos.....	42
2.4. Caracterización del sistema de seguimiento	44
2.4.1. Corrección de inhomogeneidad de cuadrantes del fotodiodo	44
2.4.2. Caracterización de los cuadrantes del fotodiodo mediante un barrido bidimensional y obtención del error del sistema de control.....	46
2.5. Monitoreo del seguidor solar	49
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	51
3.1. Ensamblado	51
3.2. Optimización del sistema de seguimiento (Mecánica, Electrónica y de Código)	53
3.2.1. Circuito amplificador de trasimpedancia	55

3.2.2.	Pruebas de código de seguimiento y optimización de tiempo de iteración (<i>delay</i>)	58
3.2.3.	Montaje	60
3.3.	Calibración del paso mínimo de los motores a pasos	61
3.4.	Caracterización del sistema de seguimiento	62
3.4.1.	Corrección de inhomogeneidad de cuadrantes del fotodiodo	62
3.4.2.	Caracterización de los cuadrantes del fotodiodo mediante un barrido bidimensional y obtención del error del sistema de control.....	63
3.5.	Monitoreo del seguidor solar	73
CONCLUSIONES.....		76
PERSPECTIVAS.....		78
BIBLIOGRAFÍA		80
ANEXOS		85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Capacidad y tipo de CPV instalada anualmente en el mundo indicando el tipo (HCPV o LCPV), según se deriva de los anuncios públicos, actualizado hasta marzo de 2017	5
Figura 1.2. Aumento de la capacidad de potencia de los sistemas CPV de 2011 a 2025	6
Figura 1.3. Reducción del coste unitario de CPV (€/W) de 2011 a 2019 para cuatro categorías de tamaño de potencia.....	7
Figura 1.4. Diagramas de las tecnologías que cubre la Norma IEC 62108	9
Figura 1.5. Diagrama de un colector cilindro parabólico	10
Figura 1.6. Esquema de funcionamiento de un concentrador de canal parabólico	10
Figura 1.7. Esquema de funcionamiento de un concentrador de Fresnel	11
Figura 1.8. Configuraciones de enfriamiento hidráulico	13
Figura 1.9. Avance previo del seguidor solar.....	24
Figura 1.10. Tarjeta de amplificación en fase inicial.	25
Figura 2.1. Coordenadas solares	30
Figura 2.2. Diagrama del fotodiodo de cuatro cuadrantes QP50-6-18u-TO8	31
Figura 2.3. Circuito amplificador de transimpedancia de un cuadrante del fotodiodo.....	32
Figura 2.4. Representación de toma de medidas para calcular el ángulo por pasos.	43
Figura 2.5. Patrón seguido en el barrido.....	46
Figura 2.6. Concentración de rayos solares sobre la base disipadora debido a la lente Fresnel.	49
Figura 3.1. a) Parte inferior del seguidor solar. b) Diseño del adaptador de manguera creado mediante modelado computacional.	51
Figura 3.2. a) Prototipo del seguidor solar. b) Diseño modelado por computadora del seguidor solar.	52
Figura 3.3. Prototipo en operación.	53
Figura 3.4. Diagrama electrónico general del sistema de control de seguimiento solar.	54
Figura 3.5. Esquema conexiones del control manual e interruptores de fin de carrera y su conexión al microcontrolador.....	55
Figura 3.6. Esquema detallado del circuito amplificador de transimpedancia y su conexión al microcontrolador.....	56
Figura 3.7. Circuito de amplificación en PCB.....	57
Figura 3.8. Gabinete con el domo. a) Vista lateral. b) Vista superior.	58
Figura 3.9. a) Controladores del motor. b) Fuente de alimentación. c) Placa de botones.	60

Figura 3.10. a) ESP32-WROOM-32 en el interior del gabinete b) Gabinete en operación.	61
Figura 3.11. a) Control manual. b) Microinterruptores.	61
Figura 3.12. Mapas de barrido de los cuadrantes del fotodiodo.....	63
Figura 3.13. a) Mapa de desviación estándar de los cuatro cuadrantes. b) Mapa del promedio de los cuatro cuadrantes.	64
Figura 3.14. Mapa de error absoluto de azimut.	65
Figura 3.15. Mapa de error absoluto de elevación.....	65
Figura 3.16. Mapa de error de azimut.....	66
Figura 3.17. Mapa de error de elevación.	66
Figura 3.18. Mapa de error compuesto.....	67
Figura 3.19. Histograma de errores obtenidos en la prueba 3 en 3D.....	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Clases de CPV	7
Tabla 1.2. Concentradores fotovoltaicos con lentes de Fresnel y enfriamiento por agua.....	14
Tabla 1.3. Matriz de atributos para las dos tecnologías de seguimiento solar	17
Tabla 1.4. Características diversos seguidores solares analizados.	22
Tabla 1.5. Continuación de la Tabla 1.4.	23
Tabla 2.1. Especificaciones de diseño, avance previo y el trabajo por realizar en el seguidor solar.	27
Tabla 2.2. Variables y pin asignado en el microcontrolador Arduino UNO.....	35
Tabla 2.3. Valores para pruebas de delay.	41
Tabla 3.1. Resultados de variación de delay.	59
Tabla 3.2. Caracterización de resolución angular de los pasos de los motores.	62
Tabla 3.3. Coeficientes individuales.	62
Tabla 3.4. Valores medidos del término de sesgo residual $V_{bias,x}$	63
Tabla 3.5. Resultados del error.	70

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1. Errores de elevación y azimut (medido en valores normalizados, antes de su conversión a grados).....	59
Gráfica 3.2. Línea de tendencia de error de elevación y obtención de coeficientes y R^2	68
Gráfica 3.3. Línea de tendencia de error de azimut y obtención de coeficientes y R^2	69
Gráfica 3.4. Errores de elevación y azimut (medido en grados).....	70
Gráfica 3.5. Histograma de errores obtenidos en la prueba 3.....	72
Gráfica 3.6. Monitoreo del fotodiodo el 8 de septiembre de 2023.....	73
Gráfica 3.7. Monitoreo del fotodiodo el 12 de septiembre de 2023.	74

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1.1. Técnicas de enfriamiento.	12
Diagrama 2.1. Metodología.	28
Diagrama 2.2. Funcionamiento del código de Arduino.....	36
Diagrama 2.3. Continuación de Diagrama 2.2.	37
Diagrama 2.4. Continuación de Diagrama 2.2.	38
Diagrama 2.5. Continuación de Diagrama 2.2.	39
Diagrama 2.6. Instrucciones del código para caracterizar los ángulos.....	43
Diagrama 2.7. Instrucciones del código para recopilar datos.....	45
Diagrama 2.8. Instrucciones del código para el barrido.	47
Diagrama 2.9. Continuación de las instrucciones del código para el barrido.	48

RESUMEN

El aprovechamiento de la energía solar de concentración, ya sea con tecnologías fotovoltaicas, fototérmicas, o la combinación de ambas, requiere de un sistema de seguimiento solar (solar tracking), que puede ser de uno o dos ejes. Este subsistema es de importancia mayor, ya que un buen seguimiento permite minimizar pérdidas asociadas a una mala focalización en el receptor. Además, el seguidor solar puede representar un porcentaje importante del costo del sistema completo. Este trabajo aborda el diseño, montaje, caracterización y optimización de un seguidor de dos ejes, cuyas aplicaciones a corto plazo serán la caracterización de celdas fotovoltaicas de capa fina y proveer calor solar a bioprocesos energéticos.

El sistema construido, basado en concentración por lentes Fresnel, se compone de un fotodiodo de cuatro cuadrantes, un controlador, dos motores a pasos, así como la mecánica asociada al seguimiento en los ángulos de azimut y elevación; y un receptor de propósito general, con circuito de refrigeración.

El aporte de este trabajo es triple: Primeramente, una nueva metodología de caracterización basada en un barrido controlado alrededor del punto óptimo de seguimiento, que permite calibrar y optimizar la operación del seguidor. Segundo, mediante buenas prácticas de instrumentación, propone un esquema de detección que minimiza el error y el ruido del sistema de control, alcanzando niveles tan bajos como $0.005^\circ \pm 0.0026^\circ$. Y tercero, tanto la detección, cálculo del error, control automático, y registro inalámbrico de datos se realizan con un solo microcontrolador de bajo costo, lo que reduce el costo total del subsistema de seguimiento.

Por lo anterior, este trabajo sienta las bases para ampliar las aplicaciones de los seguidores solares, al alcanzar prestaciones de precisión a un bajo costo y menor complejidad.

ABSTRACT

The harnessing of concentrated solar energy, whether through photovoltaic, photothermal technologies, or the combination of both, requires a solar tracking system, which can be either single or dual-axis. This subsystem is of paramount importance, as effective tracking minimizes losses associated with poor focusing on the receiver. Additionally, the solar tracker can represent a significant percentage of the total system cost. This study addresses the design, assembly, characterization, and optimization of a two-axis tracker, with short-term applications including the characterization of thin-film photovoltaic cells and providing solar heat for energy bioprocesses.

The constructed system, based on concentration by Fresnel lenses, consists of a four-quadrant photodiode, a controller, two stepper motors, as well as the mechanics associated with tracking in azimuth and elevation angles, and a general-purpose receiver with a cooling circuit.

The contribution of this work is threefold: Firstly, a new characterization methodology based on controlled scanning around the optimal tracking point, enabling calibration and optimization of the tracker's operation. Secondly, through good instrumentation practices, it proposes a detection scheme that minimizes control system error and noise, reaching levels as low as $0.005^\circ \pm 0.0026^\circ$. Thirdly, both detection, error calculation, automatic control, and wireless data logging are performed with a single, low-cost microcontroller, reducing the final cost of the tracking subsystem.

Therefore, this work lays the foundation for expanding the applications of solar trackers, enabling precision performance at a low cost and low complexity.

INTRODUCCIÓN

La irradiación solar es el recurso energético con mayor potencial, tanto directa como indirectamente, de los que se disponen en la Tierra, gran parte de las fuentes de energía renovable dependen en cierta manera de la radiación solar. Si bien la manifestación de este recurso se puede percibir en ciclos biogeoquímicos como el del agua, el movimiento del aire y la vida de las plantas, creando en parte a las energías hidráulicas, eólicas y bioenergía, el aprovechamiento directo se puede conseguir mediante diferentes tecnologías con el objetivo de generar otros recursos energéticos, tales como la electricidad y el calor. Para ello, las tecnologías más extendidas son la fotovoltaica y la fototérmica, sin embargo, ambas presentan características que han limitado la expansión y su uso.

Una desventaja de la tecnología fotovoltaica radica en el área requerida para la instalación, misma que va de la mano con la eficiencia de las celdas que se emplean en el arreglo fotovoltaico. En este contexto, resulta interesante la aparición de los sistemas de seguimiento implementados en los concentradores solares fotovoltaicos (CPV por sus siglas en inglés, Concentration Photovoltaics) y termosolares. Estos sistemas, al concentrar el flujo solar incidente en una superficie receptora óptica, logran generar una cantidad significativa de energía en un área notablemente reducida, equivalente a la célula solar. Esto posibilita la reducción de la superficie necesaria para las células solares por módulo, gracias al aumento en el flujo solar proporcionado por la relación de superficie entre el receptor óptico y la célula solar, conocido como la concentración geométrica del módulo. Esta característica estructural permite que los sistemas CPV alcancen una eficiencia de conversión de energía superior a un costo continuamente decreciente en comparación con otras tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, es importante señalar que esta tecnología se beneficia principalmente de la radiación solar directa, a diferencia de los sistemas fotovoltaicos convencionales, que también pueden aprovechar la radiación difusa y albedo. Por lo tanto, la necesidad de seguir continuamente el movimiento solar es esencial para garantizar su eficacia [1].

Los sistemas de seguimiento son indispensables en la optimización de la captación de energía solar. Estos sistemas dinámicos, en particular los de dos ejes, son capaces de rastrear la trayectoria del sol a lo largo del día, lo que les permite ajustar continuamente la posición de los concentradores para recibir la máxima radiación solar. Al maximizar la captación de energía solar, los seguidores solares contribuyen a maximizar la eficiencia en la generación de electricidad y

calor a partir de energía solar. Además, gracias a su capacidad para mejorar la eficiencia y la productividad, los seguidores solares han impulsado la adopción y la implementación de tecnologías solares a gran escala en todo el mundo [2].

En este proyecto de tesis se desarrolló un prototipo de seguidor solar de dos ejes, como parte de un sistema de concentración solar fotovoltaica basado en lentes de Fresnel, diseñado para rastrear de manera precisa la trayectoria solar y mantener estable la cantidad de energía en el receptor, el cual incluye enfriamiento activo ya sea para enfriar celdas o aprovechar el calor del fluido de trabajo, según la aplicación. Este sistema fue inicialmente concebido como un banco de pruebas para celdas fotovoltaicas de capa fina. Sin embargo, se contempla también su uso para generar energía fotovoltaica de concentración; además de otras aplicaciones que requieran calor solar concentrado.

Para dar cuenta de lo descrito, este trabajo se ha organizado como sigue:

Capítulo 1. Antecedentes: En este se presentan y analizan investigaciones previas, estudios relevantes y trabajos que abordan diversos aspectos de importancia en el área de los seguidores solares, tales como el error de medición, algoritmos de control, tipos de motores, el uso de diferentes tipos de componentes electrónicos y microcontroladores, etc., así como conceptos y principios fundamentales que sustentan el trabajo y los objetivos a cumplir.

Capítulo 2. Metodología: En esta sección se detallan los procedimientos seguidos para alcanzar los objetivos establecidos. Entre las tareas clave que se abordarán se encuentran la caracterización y optimización del sistema de seguimiento, el proceso de ensamblado de todos los componentes y la implementación de un monitoreo inalámbrico del seguidor solar.

Capítulo 3. Resultados: En esta sección se presentan, analizan y discuten los hallazgos y datos recopilados durante la investigación, los cuales abordan la optimización del prototipo del seguidor solar, así como la obtención de los valores de calibración del paso mínimo de los motores, los valores para reducir el ruido y la caracterización del sistema de seguimiento, que implica la corrección de inhomogeneidad de los cuadrantes del fotodiodo y la obtención del error del sistema de control.

Conclusiones: En esta sección se presenta una visión detallada de la validación experimental, el rendimiento del circuito amplificador, la precisión del sistema de control y como estas prestaciones se sitúan en el estado del arte de las disciplinas.

Perspectivas: En esta sección se identifican las futuras aplicaciones y aprovechamiento del prototipo diseñado. Las perspectivas abordadas en esta sección son la automatización e integración de control remoto, el uso del agua residual del sistema de enfriamiento para el lavado de sargazo y el uso del prototipo para brindar una alternativa de método de disrupción celular en microalgas.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

Los sistemas de seguimiento solar juegan un papel fundamental en una variedad de aplicaciones de energía solar concentrada y no concentrada, ofreciendo beneficios en términos de potencia y eficiencia en comparación con los sistemas fijos convencionales, lo que los convierte en una herramienta crucial para la generación de energía renovable. Estos sistemas controlan la orientación para maximizar la captación de radiación solar en los colectores y paneles solares. Existen dos tipos principales de sistemas de seguimiento solar: los de un solo eje y los de dos ejes, cuya implementación depende del tipo de concentrador, y se ha relacionado con la optimización del rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas y fototérmicas [2].

En el contexto de los sistemas de concentración fotovoltaica (CPV) y sistemas de concentración térmica fotovoltaica (CPVT) los seguidores solares son indispensables. En el caso de los CPV, los seguidores solares desempeñan un papel fundamental al mantener los paneles fotovoltaicos alineados óptimamente con el sol, lo que resulta en una mayor eficiencia en la conversión de la radiación solar en electricidad [3][4].

Por otro lado, los sistemas CPVT combinan la generación de electricidad con la captación de calor, lo que los convierte en una opción versátil para una variedad de aplicaciones, como el bombeo de agua, sistemas de agua caliente, destilación solar de agua salobre y de mar, refrigeración solar, deshidratación de alimentos y sistemas fotovoltaicos integrados en edificios. Los seguidores solares en los sistemas CPVT también permiten un seguimiento preciso del sol, lo que maximiza tanto la generación de electricidad como la captación de calor, lo que resulta en un rendimiento óptimo en comparación con los sistemas convencionales [3].

A pesar de sus ventajas, los sistemas CPV y CPVT se encuentran con desafíos críticos relacionados con la integración de tecnologías, el control de costos y el mantenimiento a largo plazo. La complejidad inherente a la concentración de la radiación solar y la necesidad de mantener la eficiencia operativa plantean interrogantes sobre la viabilidad económica de estos sistemas a medida que se expanden en aplicaciones más amplias.

La investigación continua y la innovación se tornan imperativas en estas áreas para superar los obstáculos mencionados y mejorar tanto la viabilidad económica como la eficiencia de los sistemas CPV y CPVT. La integración efectiva de tecnologías, la optimización de los costos

operativos y de capital, así como las estrategias de mantenimiento a largo plazo, son aspectos clave que deben abordarse para asegurar el éxito y la aceptación generalizada de estas tecnologías en el panorama energético actual. Estos esfuerzos no solo contribuirán al progreso técnico, sino que también respaldarán la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y eficientes [3][4].

1.1. Concentrador solar fotovoltaico (CPV)

Los CPV forman parte de las tecnologías fotovoltaicas, lo que se traduce en que convierten la luz solar directamente en electricidad del mismo modo que la fotovoltaica pero su diferencia recae en que los CPV tienen la adición de un sistema óptico para redireccionar la radiación solar incidente sobre una superficie para que de esta manera pueda concentrarla sobre otra superficie absorbadora y algunas veces, éstos utilizan un sistema de enfriamiento para aumentar su eficiencia. También, esta tecnología utiliza elementos ópticos como lentes o espejos para concentrar la radiación solar en una celda fotovoltaica de área reducida, permitiendo el uso de módulos pequeños de celdas más eficientes [5].

Entre el año 2011 y el 2014 se presentó un importante incremento global en la instalación de sistemas CPV, pero en el año 2015 esta tendencia se vio interrumpida como se puede observar en la Figura 1.1. Esto fue debido a la reducción significativa de la capacidad anual instalada de alrededor de 17 MW [3].

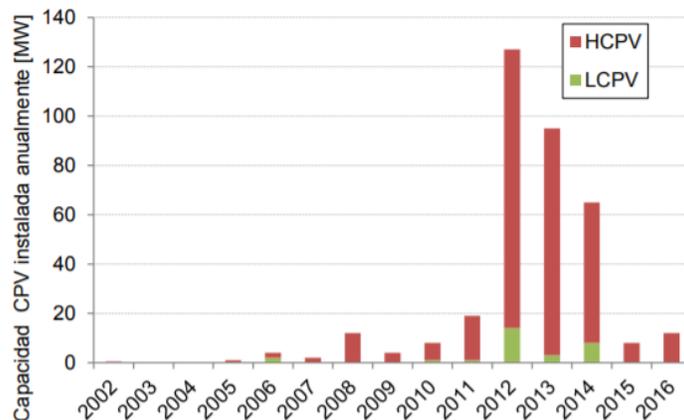


Figura 1.1. Capacidad y tipo de CPV instalada anualmente en el mundo indicando el tipo (HCPV o LCPV), según se deriva de los anuncios públicos, actualizado hasta marzo de 2017 [3].

Los sistemas CPV han demostrado una eficiencia comercial del 30% y han superado el 45% en condiciones de laboratorio, lo que ha llevado a su creciente adopción a lo largo de los años. Como muestra la Figura 1.2, esta gráfica ilustra el aumento de la capacidad de potencia de los sistemas CPV desde 2011 hasta 2019, junto con dos pronósticos para el período de 2020 a 2025, uno considerado pesimista y otro optimista. En el escenario optimista, se espera que la capacidad de energía de los sistemas CPV alcance los 800 MW para el año 2025 [6].

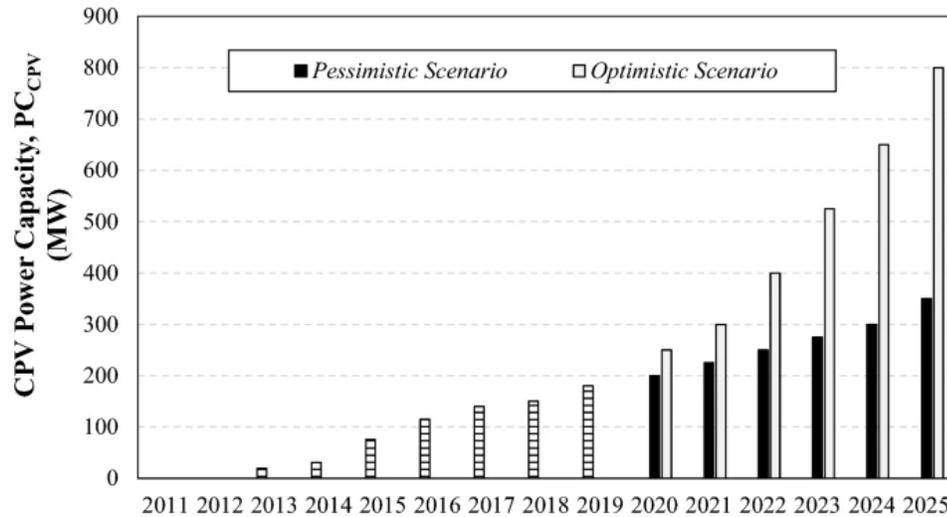


Figura 1.2. Aumento de la capacidad de potencia de los sistemas CPV de 2011 a 2025 [6].

Lo anterior ha permitido la reducción de los costos de estos sistemas como se aprecia en la Figura 1.3. Aquí los CPV son divididos en cuatro categorías según la potencia eléctrica máxima y es posible observar que el costo unitario de los sistemas CPV se reduce entre dos y tres veces desde 2011 hasta 2019 para cualquier rango de potencia, llegando incluso al valor de alrededor de 1 €/W [6].

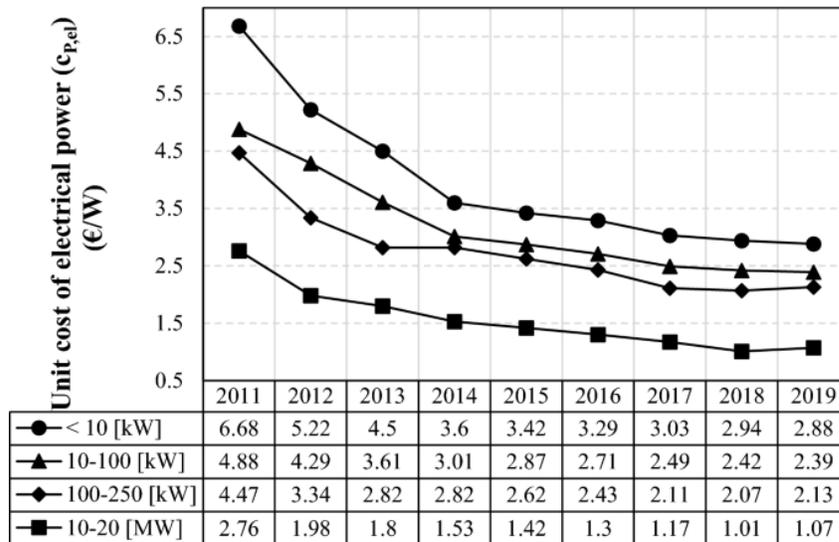


Figura 1.3. Reducción del coste unitario de CPV (€/W) de 2011 a 2019 para cuatro categorías de tamaño de potencia [6].

Por otro lado, existen dos clases de CPV distinguidas por su factor de concentración, estos pueden ser diferenciados como sistemas de alta o baja concentración, siendo sus características las presentadas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clases de CPV [7].

Tipo de CPV	Factor de concentración típica	Seguimiento de trayectoria solar	Tipo de celda
CPV de alta concentración	300-1000	Dos ejes	Celdas multiunión
CPV de baja concentración	<100	Uno o dos ejes	c-Si u otras

A su vez, estos sistemas pueden ser clasificadas desde el punto de vista óptico en cinco grupos fundamentales de acuerdo con su método de concentración primario:

- Lentes de concentración lineal.
- Lentes de concentración puntual.
- Espejos de concentración lineal.
- Espejos de concentración puntual.
- Sistemas con receptor central.

Las lentes de concentración tanto lineal como puntual más empleadas en los CPV son las denominadas lentes de Fresnel debido a su configuración ya que gracias a esta se reduce

significativamente su volumen y costo en comparación a las lentes convencionales. Las tecnologías más populares para reflejar la luz solar son las de canal parabólico entre los lineales y los discos parabólicos para concentración puntual [7].

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés), es una organización encargada de la normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas basada en la experiencia y los desarrollos técnicos en normas que regulan la estandarización. Esta comisión fue el primer organismo en desarrollar una norma exclusiva para la tecnología CPV, IEC 62108. Esta norma cubre cinco diferentes tecnologías (Figura 1.4) y especifica los requisitos mínimos para la cualificación del diseño y la homologación de módulos CPV y conjuntos adecuados para funcionamiento a largo plazo en climas generales al aire libre [8].

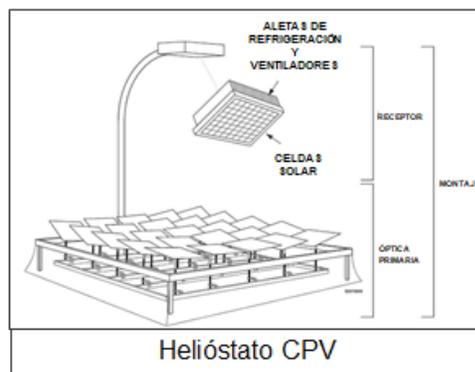
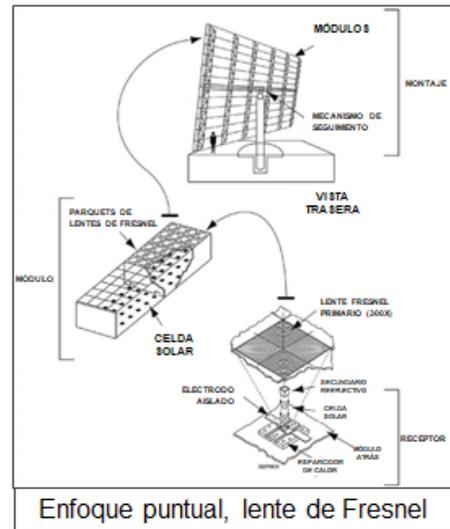
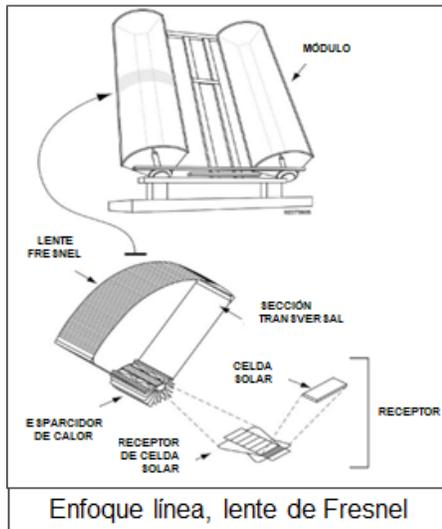
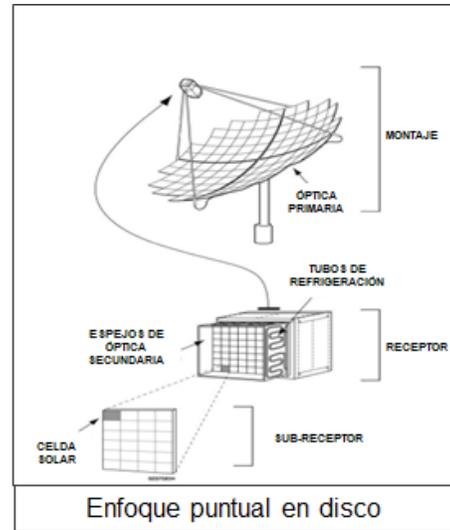
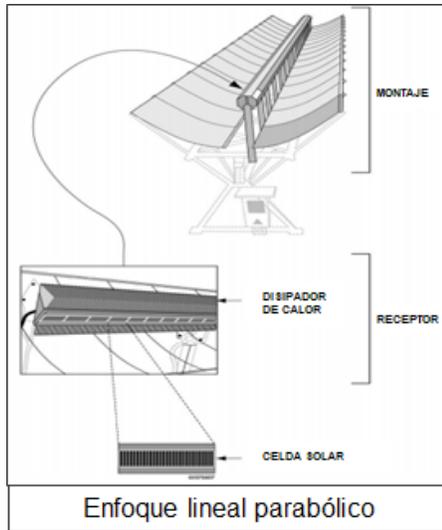


Figura 1.4. Diagramas de las tecnologías que cubre la Norma IEC 62108 [6].

Un colector solar cilíndrico parabólico (CCP) (Figura 1.5) está compuesto por un canal cuyo perfil tiene forma de parábola, permitiendo así que la radiación solar que incide paralela al eje focal de la parábola se concentre en el foco de esta [9].

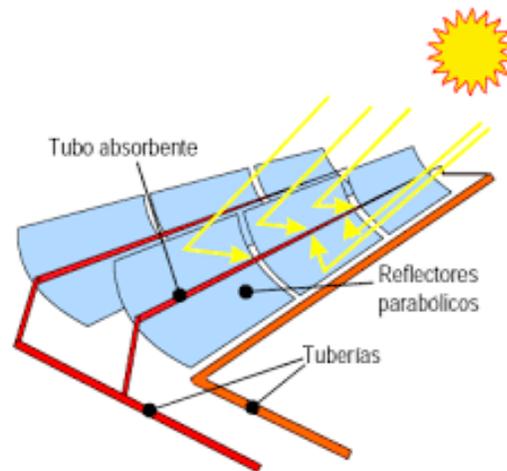


Figura 1.5. Diagrama de un colector cilindro parabólico [10].

Estos sistemas suelen trabajar por encima de los 100°C , y pueden acoplarse a un ciclo Rankine de agua vapor para producir electricidad, la cual resulta poco competitiva frente a las centrales eléctricas convencionales por lo que necesario usar estrategias gubernamentales o políticas como la asignación de subsidios a la producción o bien incentivos fiscales a la inversión para lograr crear un mercado que pueda abaratar los altos costos iniciales de instalación [9].

Por otro lado, los concentradores de lente de Fresnel resultan ser una alternativa a las plantas CCP, ya que representan una aproximación de un canal parabólico como se puede observar en las Figuras 1.6 y 1.7.

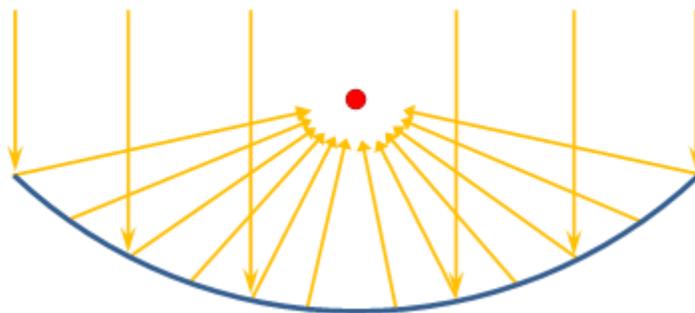


Figura 1.6. Esquema de funcionamiento de un concentrador de canal parabólico [9].

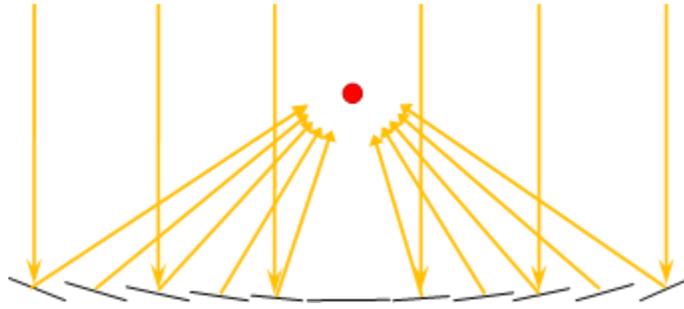


Figura 1.7. Esquema de funcionamiento de un concentrador de Fresnel [9].

1.2. Lente de Fresnel

La lente de Fresnel es el concentrador refractivo más desarrollado que existe actualmente. Estas lentes están fabricadas de plástico con una alta calidad óptica, no presentan aberraciones esféricas y pueden operar con concentraciones bajas (1-40 soles) y medias (40-300 soles) [4][11].

Este tipo de lente está compuesto de una cadena de prismas, las cuales representan cada una la pendiente de la superficie de la lente, pero sin el material del cuerpo completo de un singlete convencional. Su principio básico de operación consiste en eliminar la mayor cantidad de material óptico posible mientras se mantiene la curvatura de la superficie, lo cual es posible gracias a que la potencia refractiva de una lente solo está contenida en las interfaces ópticas [12].

Entre las ventajas de este sistema puede mencionarse que: son más delgados que los lentes convencionales, lo que hace más barata su construcción, también requiere menos material que los lentes convencionales, es capaz de separar la luz directa y difusa, adecuado para controlar la iluminación y temperatura de un edificio interior [13].

En un CPV con lente de Fresnel, la dirección de los rayos concentrados puede ser de manera lineal o puntual hacia el módulo. Para este proyecto, se está utilizando una concentración de forma lineal debido a que se busca que los rayos solares no sean concentrados en un solo punto, sino que estos se dispersen a lo largo de la base disipadora para evitar que esta concentración sobrecaliente los módulos fotovoltaicos que se requiera caracterizar ya que la temperatura que se alcanza con la concentración es muy elevada.

1.3. Sistema de enfriamiento

Uno de los problemas del uso de la lente Fresnel es que la energía que concentra no es uniforme, provocando un punto caliente en el módulo haciendo que la temperatura de la celda se eleve y por consecuencia se deforme. Esto sucede cuando la celda se encuentra total o parcialmente expuesta a los rayos solares durante un largo periodo de tiempo, polarizándose de forma inversa y disipando la energía en forma de calor [14][15][16].

No toda la energía que se recibe del sol es transformada en electricidad por lo que el calor residual del proceso debe ser disipado en el medio ya que, de no ser así, la eficiencia y la vida útil de la celda disminuyen. Para enfrentar esta problemática existen diversas técnicas de refrigeración como se muestra en el Diagrama 1.1 [17].



Diagrama 1.1. Técnicas de enfriamiento.

Para esta investigación se seleccionó un sistema de enfriamiento tipo hidráulico activo por agua para aprovechar el calor que produce el condensador por la energía excedente que se genera por la concentración de los rayos solares, siendo este compatible con los módulos fotovoltaicos ya que absorbe principalmente la luz en radiaciones infrarrojas, las cuales tienen longitudes de onda más largas, debido a las propiedades ópticas del agua. Existen distintas configuraciones de este sistema como se muestra en la Figura 1.8, siendo la configuración d) la elegida para el sistema desarrollado en este documento [18].

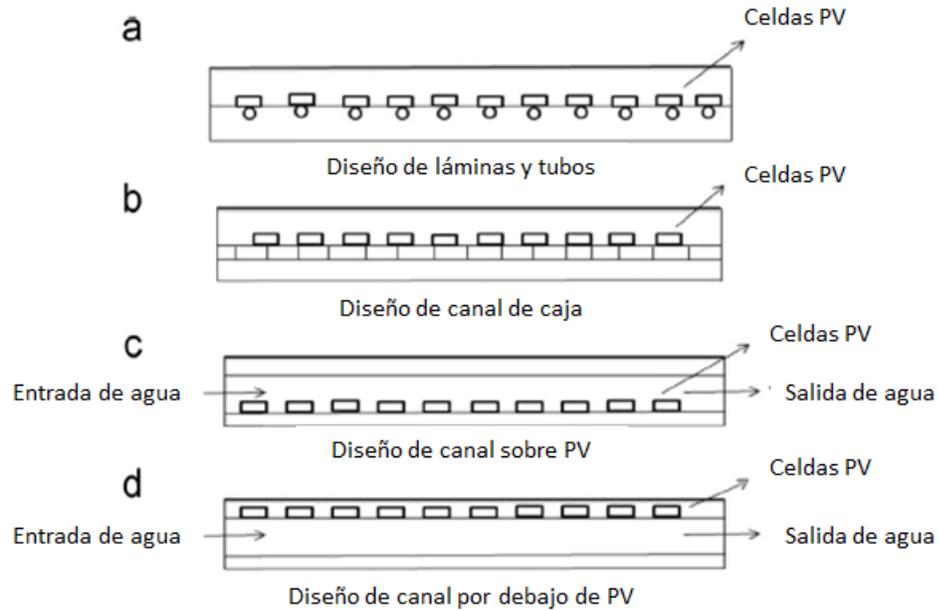


Figura 1.8. Configuraciones de enfriamiento hidráulico [18].

1.4. Concentrador fotovoltaico térmico (CPVT)

Este tipo de concentrador permite generar energía eléctrica y térmica, por lo que se considera un concentrador fotovoltaico térmico (CPVT, por sus siglas en inglés), cuyas principales ventajas son:

- Alta eficiencia eléctrica y térmica.
- Mantiene a temperatura óptima una celda fotovoltaica.
- Alta calidad de energía térmica.
- Diseño flexible.
- Bajo costo de inversión [18][19].

Como se mencionó anteriormente, una de las formas de aprovechar al máximo la energía que produce el concentrador con lente de Fresnel es la cogeneración capturando radiación solar y el calor residual. Esto puede lograrse con colectores fotovoltaicos/térmicos (PV/T) que contienen un intercambiador de calor detrás de las células fotovoltaicas para recoger el calor rechazado por las células [20].

A lo largo de los años se han desarrollado investigaciones sobre los diferentes tipos de refrigeración en concentradores fotovoltaicos con lentes de Fresnel aprovechando la energía térmica proveniente de la misma concentración, dentro de las que destacan los que se presentan en la Tabla 1.2 usando enfriamiento por agua [18].

Tabla 1.2. Concentradores fotovoltaicos con lentes de Fresnel y enfriamiento por agua [21][22][23].

Autor	Material de celda	Tipo de concentración	Radio de concentración (soles)	Ubicación
(Chenlo & Cid, 1987)	Silicio Monocristalino	Lineal	24	Madrid, España
(Sonneveld, y otros, 2011)	Silicio Monocristalino	Lineal	25	Países Bajos
(Xu, Ji, Sun, & Han, 2015)	InGap/GaAs/Ge	Puntual	No menciona	Corea del Sur

Si bien el aprovechamiento del recurso solar, tanto en la forma fotovoltaica como térmica, contribuye a mejorar la eficiencia de estos colectores solares, la inclusión de un sistema de seguimiento en estos dispositivos puede llevar a un aprovechamiento aún mayor de este recurso.

1.5. Sistema de seguimiento

Los avances tecnológicos a gran escala y los altos costos de inversión a menudo resultan en desafíos para mantener en funcionamiento los dispositivos con sistemas de seguimiento. Por esta razón, Tarazona *et al.* realizaron un análisis cualitativo de las variables relevantes para la implementación de seguimiento solar en sistemas fotovoltaicos de baja escala, que se basa en el cumplimiento en mayor o menor medida de una serie de atributos que toman en cuenta los siguientes aspectos [24]:

- La tecnología valora el conocimiento local para el montaje, operación y mantenimiento.
- La tecnología reconoce y hace uso de recursos y materiales locales para fabricar el sistema.
- La tecnología es sostenible, tanto para su operación a largo plazo como para su mantenimiento [24].

Este análisis considera los subsistemas de seguimiento de un eje y de dos ejes, los cuales son clasificados según los grados de libertad, es decir, el número de direcciones en las que se puede mover el dispositivo. Dentro de estas dos clasificaciones, los sistemas pueden variar dependiendo del sistema de control utilizado, del cableado utilizado, de las estrategias de seguimiento utilizadas o según el grado de libertad de movimiento del sistema [25].

De acuerdo con el sistema de actuación, existen dos tipos de seguidores: los pasivos, que se mueven en respuesta a un desbalance de presión entre dos puntos en los extremos del seguidor solar, y los activos, que utilizan mecanismos controlados por un circuito electrónico, como motores eléctricos, para ubicar los paneles en la posición deseada [26][27].

Por el tipo de sistema fotovoltaico que realiza la conversión de energía solar a eléctrica, se clasifican en seguidores de sistemas fotovoltaicos concentrados, que requieren una alta precisión en la orientación de los paneles, y seguidores de sistemas fotovoltaicos no concentrados, que requieren menos precisión [27].

Finalmente, los seguidores pueden ser controlados con lazos cerrados, que utilizan sensores para determinar la posición del sol, o con lazos abiertos, basados en algoritmos matemáticos con valores predefinidos de la posición del sol [28].

1.5.1. Subsistemas de seguimiento solar de un solo eje (1D)

Estos sistemas, considerados como una tecnología madura tanto en entornos de laboratorio como en aplicaciones comerciales, se destacan por su empleo de un solo eje de movimiento cuya rotación es impulsada por un único motor central o por un eje que conecta varias filas a un motor más grande y sus principales componentes incluyen un mecanismo y un sistema de transmisión, un motor y un sistema de control que está gobernado por microprocesadores, los cuales desempeñan un papel esencial, ya que incorporan el desarrollo de algoritmos solares o el procesamiento de datos de sensores que miden la radiación solar [24].

A pesar de su simplicidad, el sistema de seguimiento solar (1D), que solo permite el movimiento horizontal o vertical del módulo fotovoltaico, tiene una eficiencia relativamente baja en comparación con los sistemas de seguimiento de dos ejes. Sin embargo, el carácter modular de estos sistemas les permite ser desarrollados tanto a nivel centralizado como descentralizado. En

laboratorios, se han creado numerosos prototipos a pequeña escala, los cuales han sido probados y escalados finalmente a tamaños comerciales, con el objetivo de ser implementados en campos solares a gran escala [24].

1.5.2. Subsistema de seguimiento solar de dos ejes (2D)

Este subsistema en su forma más común realiza movimientos tanto en azimut como en elevación y tiene una amplia gama de aplicaciones en los ámbitos comerciales e industriales. Estas aplicaciones abarcan desde seguimiento solar hasta seguimiento satelital. El sistema de seguimiento de dos ejes (2D) comparte similitudes con el sistema de un solo eje (1D) en cuanto a sus componentes principales, pero se diferencia en la cantidad de elementos involucrados [24].

En el caso del sistema 2D, el mecanismo de seguimiento debe integrar dos o más sistemas de transmisión, así como dos motores independientes para cada eje. Además, se requiere un sistema de control gobernado por un conjunto de microcontroladores. Esto implica un mayor desarrollo de *software*, que incluye algoritmos de control, o la aplicación de sensores de radiación solar. Estos componentes pueden ser utilizados en sistemas de diferentes escalas y pueden ser adquiridos o fabricados localmente, lo que impactará en la eficiencia del sistema según la tecnología empleada [24].

A pesar de su mayor complejidad de construcción y programación en comparación con el sistema 1D, el sistema de seguimiento 2D ofrece una mayor eficiencia, ya que sigue la trayectoria solar tanto en horizontal como en vertical al mismo tiempo. Esto lo convierte en una opción tecnológica avanzada y genera numerosas aplicaciones a nivel mundial [24].

Sin embargo, es importante destacar que el sistema 2D tiene un mayor consumo de energía debido al aumento de componentes en comparación con el sistema 1D. El mantenimiento y la operación también requieren conocimientos técnicos, especialmente en programación, debido a la mayor complejidad del sistema [24].

En resumen, el sistema de seguimiento solar 2D se desarrolla tanto a nivel centralizado como descentralizado en todo el mundo. Su implementación abarca desde sistemas a pequeña escala en laboratorios y edificios hasta sistemas de mediana y gran escala en parques solares y plantas de producción masiva de electricidad mediante paneles solares.

En la Tabla 1.3 se presenta la matriz de atributos para las dos tecnologías de seguimiento solar, resultado del análisis realizado por Tarazona *et al.*, donde los atributos considerados son los mencionados a continuación, que dentro de la matriz se identifican con una X.

A1-El sistema tiene madurez tecnológica.

A2-El sistema es fácil de operar y mantener.

A3-El sistema presenta bajo costo de inversión.

A4: Materiales de construcción ampliamente disponibles.

A5-El sistema es eficiente a pequeña escala.

A6-El sistema es autónomo, no requiere insumos adicionales (Uso de energía).

A7-El sistema es fácilmente escalable.

Tabla 1.3. Matriz de atributos para las dos tecnologías de seguimiento solar [24].

Atributo Tecnología	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
1D			X	X		X	X
2D	X		X	X	X	X	X

Como señalan Tarazona *et al*, se evidencia que ambas tecnologías de seguimiento solar han sido diseñadas para abordar las necesidades tanto a nivel centralizado como descentralizado, con el propósito de mejorar la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos que tradicionalmente se instalan de manera estática. En contraposición al enfoque teórico convencional, es posible afirmar que la tecnología de seguimiento solar de dos ejes se presenta como la opción más adecuada para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos de pequeña escala. No obstante, la tecnología de seguimiento de un solo eje tiene el potencial de superar las limitaciones que presenta mediante el desarrollo de nuevos sistemas en un futuro cercano [24].

Por otro lado, uno de los principales factores que influyen en la eficiencia del seguidor solar es el nivel de error ya que la precisión del seguimiento solar garantiza la máxima captación de la radiación solar incidente, lo que se traduce en una mayor producción de energía y una mejor eficiencia operativa. Además, un alto nivel de error podría causar un deterioro prematuro de los componentes del sistema y afectar su vida útil.

Díaz *et al.* realizaron una investigación enfocada en abordar los desafíos asociados con la radiación difusa en los sistemas de seguimiento solar, particularmente en tecnologías avanzadas como la energía fotovoltaica de alta concentración (HCPV) y la energía solar de concentración (CSP). El estudio exploró la integración de filtros ópticos, específicamente filtros polarizadores e infrarrojos, en un sensor solar de fotodiodo de cuatro cuadrantes. El objetivo principal fue mitigar el impacto negativo de la radiación difusa en las mediciones del sensor, que a menudo introduce niveles de ruido y afecta la capacidad del controlador de circuito cerrado para lograr ganancias máximas [29].

Los resultados obtenidos revelaron que la inclusión de un filtro óptico infrarrojo condujo a una reducción sustancial del error de seguimiento. Este filtro demostró ser altamente efectivo, disminuyendo el error en un 75% bajo condiciones de luz artificial y en un impresionante 90% bajo luz solar directa. Estos hallazgos destacan la utilidad y la eficacia de los filtros ópticos en la mejora del rendimiento de los sistemas de seguimiento solar, especialmente en entornos con altos niveles de radiación difusa [29].

Por otro lado, Hoffmann *et al.* desarrollaron un seguidor solar pseudoequatorial de dos ejes utilizando cuatro resistencias dependientes de la luz (LDR, por sus siglas en inglés), dos por cada eje, para identificar la dirección del movimiento del sol, ajustando de esta manera la posición del panel fotovoltaico con ayuda de los motores, según el control realizado por un dispositivo electrónico. Este sistema se basa en un microcontrolador PIC18F452 de Microchip Technology Inc., que supervisa y controla el movimiento de los motores en función de la información capturada por los LDR. El seguidor mostró un aumento promedio mensual en la generación de energía que osciló entre 17.20% y 31.1%, lo que indica que la implementación de un sistema de seguimiento solar de dos ejes puede ser una estrategia efectiva para potenciar la eficiencia de los paneles solares y hacer más atractiva la adopción de energía fotovoltaica. Además, los niveles de captura de las fotorresistencias, registrados durante un período de evaluación, proporcionan información valiosa sobre la sensibilidad del sistema a las variaciones climáticas y temporales, reforzando la necesidad de considerar la consistencia y precisión de las mediciones en el diseño y la implementación de sistemas de seguimiento solar [30].

Asimismo, De La Cruz *et al.* desarrollaron un sistema de seguimiento solar adaptativo para paneles solares fotovoltaicos sin la necesidad de una configuración inicial donde se empleó el método estructuralista, que involucra la observación de la realidad, la construcción de modelos y

el análisis de la estructura. El sistema se basó en el uso de bloques de programación del controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés) y modelos de mecanismos, junto con teorías de ingeniería de control, como la estabilidad de sistemas dinámicos y control adaptativo. El sistema fotoeléctrico implementado consta de dos fotorresistencias conectadas al PLC, donde se calcula la diferencia de voltajes y se determina la ubicación en la que ambas fotorresistencias generan el mismo voltaje, indicando la orientación idónea con respecto a los rayos solares [31].

En los resultados presentados se observa una ligera desviación del error de seguimiento en condiciones nubladas, alcanzando un máximo de aproximadamente 14.4° en 10 horas. Además, se evidencia un sobreimpulso del 43.13% y un error en estado estable de 2.08° durante la evolución del error de seguimiento solar. No obstante, se concluye que el sistema de seguimiento solar cronológico adaptativo propuesto demuestra un bajo error bajo cielos despejados y una capacidad de adaptación razonable en condiciones nubladas, lo que lo posiciona como una solución prometedora [31].

Asimismo, las fotorresistencias son utilizadas en el sistema para detectar la posición del sol y permitir un seguimiento preciso en el diseño del sistema de seguimiento solar activo de doble eje y de bajo costo desarrollado por Kaur *et al.* Este sistema está diseñado para seguir el movimiento del sol y maximizar la potencia generada por los paneles solares al mantenerse alineados con los rayos solares y se basa en el uso de estas fotorresistencias, las cuales envían información al microcontrolador Arduino UNO, que a su vez controla el movimiento de los servomotores para mantener la orientación óptima del panel solar. Los resultados obtenidos revelaron que este sistema logra un aumento promedio de energía del 13.44% en comparación con un panel solar estático. Además, se destaca por su rentabilidad, simplicidad y eficiencia operativa automática, definiendo claramente su posición de reposo; se emplea un microcontrolador de placa única de bajo costo, el Arduino UNO, como unidad de control, lo que permite que el seguidor solar desarrollado se utilice para la generación de energía solar fotovoltaica a pequeña escala en ubicaciones remotas [32].

Por otro lado, Yao *et al.* desarrollaron una investigación que aborda un seguidor solar de doble eje de propósito múltiple que se puede aplicar a sistemas de energía solar. Este rastreador utiliza un sistema de montaje de reloj de declinación que posiciona el eje primario en la dirección este-oeste. Sobre la base de este sistema de montaje, se han desarrollado dos estrategias de

seguimiento: una estrategia de seguimiento normal y una estrategia de ajuste diario. La primera se aplica a sistemas fotovoltaicos (PV) planos, mientras que la segunda se utiliza en sistemas de energía solar de concentración (CSP). La estrategia de seguimiento normal mantiene los errores de seguimiento por debajo de los valores predefinidos, demostrando una alta precisión. Por otro lado, la estrategia de ajuste diario simplifica el proceso de seguimiento mediante un único ajuste del eje primario al día y un giro constante del eje secundario a 15° por hora. Aunque esta estrategia puede presentar errores de seguimiento algo mayores, se estima que la pérdida de coseno promedio anual para sistemas fotovoltaicos planos es inferior al 1.3%. Los resultados experimentales muestran que el error de seguimiento en la estrategia normal es inferior al 0.15%, lo que garantiza una alta precisión de seguimiento para los sistemas de energía solar [33].

Stanek *et al.* realizaron una investigación cuyo enfoque es analizar el impacto del error del sistema de seguimiento solar en la eficiencia de los colectores solares lineales en colectores cilindro parabólicos. En este trabajo se hizo uso de modelos de trazado de rayos de Monte Carlo para comprender la distribución de la radiación solar en la superficie del absorbedor, lo que proporcionó una comprensión más profunda de la sensibilidad del sistema a diversos factores. Los resultados revelaron que un error máximo de ángulo de seguimiento de 1.5° para un diámetro de 33.7 mm y 0.9° para un diámetro de 21.3 mm no afecta significativamente el rendimiento del absorbente lineal, sin embargo, este se puede ver afectado en un 4.7% y 42.5% respectivamente cuando el error es de 2° . Además, se observó que a partir de un error de 4° en el seguimiento solar, solo se recibía radiación no concentrada en el absorbedor, lo que subraya la importancia crítica de mantener una alta precisión en el sistema de seguimiento [34].

La revisión de antecedentes destaca la evolución de las tecnologías de seguimiento solar, enfocándose en la mejora de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos. Se han propuesto diversas soluciones, desde tecnologías de un solo eje hasta enfoques adaptativos, cada una con sus ventajas y limitaciones.

Tarazona *et al.* señalan la relevancia de las tecnologías de seguimiento solar tanto a nivel centralizado como descentralizado. La investigación destaca que la tecnología de dos ejes puede ser la opción óptima para sistemas de pequeña escala, pero la de un solo eje tiene potencial para superar limitaciones con desarrollos futuros [24].

Díaz *et al.* exploraron la mitigación de la radiación difusa en sistemas de seguimiento solar mediante la incorporación de filtros ópticos, logrando reducciones significativas en el error de seguimiento. Este enfoque destaca la importancia de considerar la radiación difusa y sugiere que la implementación de filtros puede ser crucial para mejorar la eficacia del seguimiento solar, especialmente en entornos con altos niveles de radiación difusa [29].

Hoffmann *et al.* demostraron que un sistema de seguimiento solar de dos ejes puede aumentar significativamente la generación de energía, subrayando la efectividad de esta tecnología para mejorar la eficiencia de los paneles solares. Sin embargo, la consistencia y precisión en las mediciones son esenciales, enfatizando la necesidad de abordar el nivel de error para garantizar un rendimiento óptimo [30].

En contraste, De La Cruz *et al.* propusieron un sistema de seguimiento solar adaptativo que utiliza fotorresistencias, presentando un bajo error bajo cielos despejados y una capacidad razonable de adaptación en condiciones nubladas. Esto sugiere que, a pesar de la presencia de un nivel de error, el sistema puede ofrecer un rendimiento satisfactorio en diversas condiciones climáticas [31].

Kaur *et al.* desarrollan un seguidor solar de bajo costo con Arduino UNO, mostrando un aumento significativo en la generación de energía. Esto sugiere que la implementación de sistemas de seguimiento solar de dos ejes puede ser rentable y eficiente, especialmente en ubicaciones remotas [32].

Yao *et al.* proponen un seguidor solar de doble eje de propósito múltiple con estrategias específicas para sistemas fotovoltaicos planos y sistemas de energía solar de concentración. Este enfoque demuestra una alta precisión de seguimiento y flexibilidad para diferentes aplicaciones [33].

Stanek *et al.* analizan el impacto del error en el seguimiento solar en colectores solares lineales, resaltando la crítica importancia de mantener una alta precisión en el sistema de seguimiento para garantizar un rendimiento óptimo [34].

Por otro lado, Fuentes *et al.* realizaron una investigación donde se presenta una revisión sistemática de los algoritmos de control implementados en sistemas de seguimiento solar activos.

Estos algoritmos se clasifican según tres estrategias de control de seguimiento solar: lazo abierto, lazo cerrado y una combinación de ambas, llamada aquí lazo híbrido. En este trabajo se concluye que la estrategia de control de seguimiento solar más ampliamente utilizada es la de lazo cerrado, que representa el 54.39% de todas las publicaciones consultadas. Asimismo, se determinó que los algoritmos de control más aplicados en los sistemas de seguimiento son los de *on-off*, lógica difusa, proporcional-integral-derivativo (PID) y proporcional-integral (PI, representando el 57.02%, 10.53%, 6.14% y 4.39%, respectivamente. En esta revisión se destaca que la mayoría de los trabajos consultados de control *on-off* en lazo cerrado emplean señales de matrices de fotosensores de bajo costo como fotodiodos o LDR para proporcionar retroalimentación para el sistema de control. También, debido a su simplicidad y bajo costo, se han implementado sistemas integrados de bajo costo como el Arduino en varios trabajos, algunos de los cuales son el de Morón *et al.*, Hammoumi *et al.* y Jamroen *et al.*, en los que se reportó un aumento en la producción de energía el 18%, 36.26% y 44.89%, respectivamente, con respecto a un sistema fotovoltaico fijo [35][36][37][38].

A continuación, se presenta las Tablas 1.4 y 1.5 donde se resumen las aportaciones de los autores citados, así como las principales características de sus sistemas de seguimiento solar.

Tabla 1.4. Características diversos seguidores solares analizados.

Autor	Algoritmo de control	Error de seguimiento	Localización del sol	Tipo de motor	Unidad de control
Díaz <i>et al.</i> [29]	PI, PID y controlador de cascada	Bajo luz artificial <u>Controlador PI:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Sin filtro: 0.0816° • Con filtro polarizador: 0.0366° • Con filtro infrarrojo: 0.0176° <u>Controlador PID:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Sin filtro: 0.103° • Con filtro polarizador: 0.089° • Con filtro infrarrojo: 0.075° <u>Controlador de cascada:</u>	Fotodiodo de cuatro cuadrantes (circuito integrado de sensores OPT101)	Servomotor	<ul style="list-style-type: none"> • Controlador PI • Controlador PID • Controlador de cascada

Tabla 1.5. Continuación de la Tabla 1.4.

		<ul style="list-style-type: none"> • Sin filtro: 0.018° • Con filtro polarizado r: 0.008° • Con filtro infrarrojo: 0.007° 			
Hoffmann et al. [30]	<i>On-off</i>	No especificado	Fotorresistencias	Motor de corriente directa	Microcontrolador PIC18F452
De La Cruz et al. [31]	Adaptativo	14.4° (máximo en condiciones nubladas)	Fotorresistencias	Motorreductor de 12V de corriente directa	Controlador Lógico Programable
		2.08° (durante la evolución del error de seguimiento solar)			
Yao et al. [33]	No especifica	Menos del 0.15%	Fotocelda de silicio de cuatro cuadrantes	Motor de corriente directa	Microprocesador ARM S3C2440X
Stanek et al. [34]	No especifica	4.7% a 42.5%	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de posición • Base de datos de posición solar 	No especificado	No especificado
Morón et al. [36]	<i>On-off</i>	No especifica	Fotodiodos	Linear y a pasos	Arduino
Hammoumi et al. [37]	<i>On-off</i>	No especifica	LDR	Servomotor	Arduino
Jamroen et al. [38]	<i>On-off</i>	No especifica	LDR	Motor de corriente directa	Arduino

En este contexto, la presente investigación propone el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes con capacidad de concentración fotovoltaica, sistema de enfriamiento, lente Fresnel y bajo nivel de ruido y error. Se utiliza un microcontrolador Arduino UNO y motor a pasos para garantizar un

sistema eficiente y accesible. La combinación de estos elementos busca abordar las limitaciones identificadas en la literatura, mejorando la precisión del seguimiento solar y, por ende, la eficiencia de la captación de radiación solar incidente.

AVANCE PREVIO

Cabe destacar que previamente a este proyecto de tesis se había construido una estructura básica, como se muestra en la Figura 1.9. En esta fase inicial, la configuración ya incluía una lente Fresnel lineal, receptor lineal con dos adaptadores de manguera, dos motores a pasos, para ajustar los ángulos de elevación y azimut; así como una fuente de alimentación que suministraba potencia a los motores y alimentación a un microcontrolador.



Figura 1.9. Avance previo del seguidor solar.

También se había implementado una tarjeta de amplificación, presentado en la Figura 1.10, que incorporaba un fotodiodo de cuatro cuadrantes (QP50-6-18u-TO8, marca Pacific Silicon Sensor) junto con un amplificador operacional cuádruple (LMC660CN, marca Texas Instruments). Este circuito tenía como objetivo amplificar las fotocorrientes del fotodiodo y acondicionar las señales para su procesamiento digital. Esta fase previa también incluía un microcontrolador Arduino UNO para monitoreo y control de punto de seguimiento.

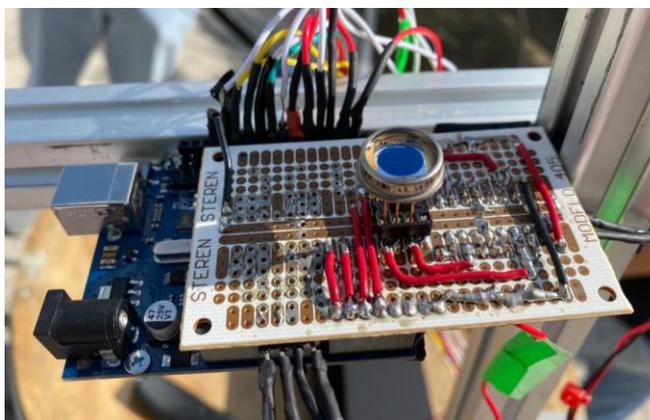


Figura 1.10. Tarjeta de amplificación en fase inicial.

Los motores a pasos se controlaban a través de dos controladores de motor (TB6600, marca Nema). Estos controladores recibían las señales de reloj digital generadas por el Arduino, permitiendo ajustar la orientación del dispositivo de forma automática. Además, el sistema incluía control motorizado manual de los ejes con dos botones y un potenciómetro, así como cuatro límites de carrera, diseñados para detener el sistema y prevenir desbordamientos fuera del rango operacional. La estructura del seguidor solar contaba también con un sistema de poleas que equilibraba el peso de la lente Fresnel mediante una mancuerna cuando el eje de elevación estaba en movimiento y con un cableado hecho con cables de conexión de alambre cubiertos de silicona. Además, cabe destacar que ya se contaba con una primera versión del código desarrollado para el seguimiento solar, probado de forma preliminar e inconclusa, aunque sirviendo como punto de partida para este proyecto de tesis.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el montaje, optimización y caracterización de un seguidor de solar de dos ejes aplicado a un concentrador solar con una lente lineal Fresnel.

Objetivos específicos

- Diseñar, optimizar y calibrar un sensor angular de irradiancia.
- Implementar un algoritmo de control *on-off* con banda muerta, para seguimiento solar.
- Caracterizar y optimizar el sistema de seguimiento.
- Implementar monitoreo de datos por interfaz web inalámbrica.
- Determinar la estadística del error del sistema de control de seguimiento.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se detallan las actividades realizadas con el fin de alcanzar los objetivos. Como punto de partida, la Tabla 2.1 cumple un triple propósito: muestra las especificaciones de diseño, el avance previo y el trabajo por realizar al inicio del proyecto de tesis.

Tabla 2.1. Especificaciones de diseño, avance previo y el trabajo por realizar en el seguidor solar.

	Especificaciones	Previo	Objeto de este trabajo
Estructura	Plano de Triplay industrial para base de plano azimutal y madera de pino para soporte.	Construida	
Eje Azimutal	Riel circular de aluminio para banda dentada con rango dinámico de 180°.	Construido	
Eje elevación	Arco de 50° para banda dentada.	Construido	Optimización de contrapeso
Motores a pasos		Montados	
Sensores de fin de carrera	Cuatro sensores normalmente abiertos.	Montados	
Tarjeta de amplificación		Primera versión construida, en tarjeta de prueba con conectores tipo macho y hembra.	Segunda versión del circuito impreso en placa fenólica (PCB) con conectores tipo <i>molex</i> .
Sensor angular de irradiancia	Fotodiodo de cuadrantes con amplificador de transimpedancia.	Primera versión construida, no optimizada.	- Segunda versión, optimizada y calibrada. - Domo con tragaluz y base <i>tip-tilt</i> incluidos.
Controlador	Microcontrolador Arduino UNO, con ADC de 10 bits.	Código de control manual y automático, primera versión.	- Código de control manual y automático, segunda versión optimizada. - Código de caracterización de ángulos - Código de barrido de recopilación de datos para calibración. - Código para barrido de datos bidimensional.
Monitoreo	Inalámbrico con interfaz web.	No implementado	Módulo ESP32-WROOM-32 con <i>data logging</i> y consulta de datos por plataforma web
Alimentación	+/- 14 VDC	Fuente simétrica doble	Fuente única
Calibración y caracterización Cableado	Prestaciones del seguidor.	No realizada Provisional	Sensor angular, error de control de seguimiento Cableado definitivo y blindado
Ensamblado mecánico		No optimizado	Optimizado

Como se puede observar en la Tabla 2.1, la mayor parte de las actividades que aborda este trabajo están enfocadas en la optimización del sistema de seguimiento y en la obtención de datos de éste. A continuación, se presenta un diagrama general de la metodología seguida para cumplir con los objetivos establecidos. A lo largo de este capítulo se presentarán los métodos y procedimientos detallados que guiarán la ejecución de estas actividades, que sientan la base para la obtención de los resultados y conclusiones que serán presentados en los capítulos posteriores.

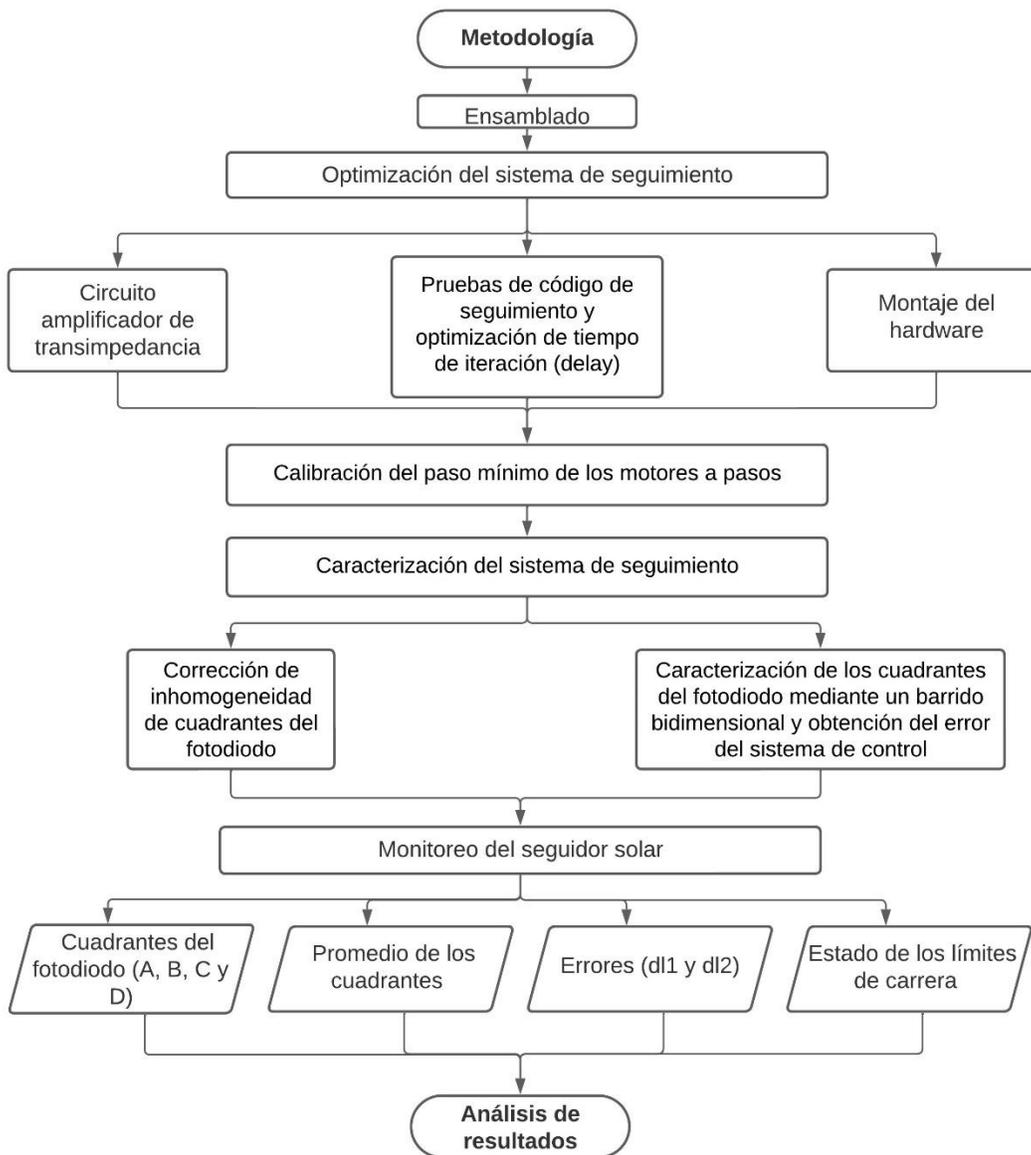


Diagrama 2.1. Metodología.

2.1. Ensamblado

En esta sección, se presenta una descripción del diseño, elementos y funcionamiento del seguidor solar implementado.

El seguidor se compone de una base disipadora de calor que a su vez funciona como área de captación (receptor), un sistema de enfriamiento activo por agua, dos ejes de seguimiento motorizados con motores a pasos, una lente Fresnel lineal encargada de concentrar los rayos solares sobre la base disipadora, una fuente de alimentación, un microcontrolador Arduino UNO, un amplificador operacional cuádruple LMC660CN, marca Texas Instruments), dos controladores de motor (TB6600, marca Nema), un control manual y un circuito de amplificación que incorpora un fotodiodo de cuatro cuadrantes (QP50-6-18u-TO8, marca Pacific Silicon Sensor).

La base disipadora de calor, con dimensiones de 60x8 cm está equipada con dos adaptadores de manguera que posibilitan el flujo de agua refrigerante para disipar o recuperar el calor absorbido por el receptor. Además, esta función permite recuperar y aprovechar el calor en otros procesos adicionales ya que el sistema de enfriamiento activo por agua incluye una bomba de corriente alterna de 18W y mangueras de agua conectadas a la base que permite que el agua fluya de un extremo al otro, disipando el calor absorbido por la base.

El seguidor tiene dos ejes de seguimiento motorizados, que se ajustan en función de la cantidad de fotones recibidos por los segmentos del fotodiodo de cuatro cuadrantes. Uno de los ejes es el arco, que permite la corrección del ángulo de elevación. Este ajuste se realiza mediante baleros que actúan como mecanismo de liberación de movimiento. Y el otro eje se encarga del seguimiento del azimut solar, el cual es el ángulo formado entre el meridiano local y la proyección de la línea del sol en el plano horizontal y se corrige gracias al motor que rota sobre la base circular. Este ángulo es complementario a la elevación solar. Para una visualización más detallada de estas coordenadas solares, se presenta la Figura 2.1, donde se indican claramente los ángulos de elevación y azimut.

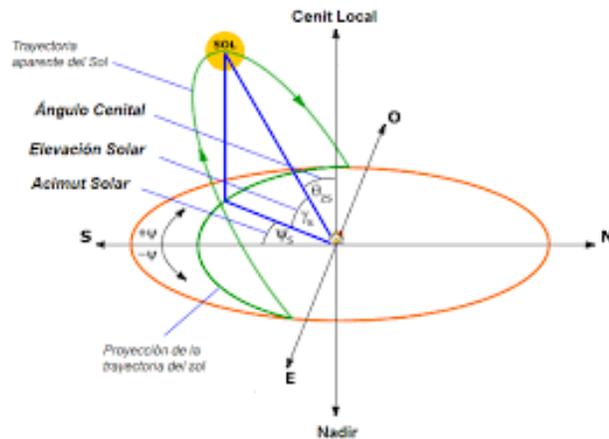


Figura 2.1. Coordenadas solares [39].

2.2. Optimización del sistema de seguimiento (Mecánica, Electrónica y de Código)

El concentrador cuenta con un sistema de seguimiento solar de dos ejes; por un lado observamos un sistema de seguimiento en el ángulo de elevación, donde se observa el recorrido mediante un arco rígido que actúa como tren de rodamiento para un motor anclado al soporte de la lente Fresnel, obteniendo un ángulo de hasta 50° ; y por otro lado se observa la base de todo el sistema como otro eje de seguimiento, donde esta gira sobre el centro del mismo para proporcionar al sistema el seguimiento del ángulo azimutal.

Para medir la irradiancia directa se utilizó un fotodiodo de cuatro segmentos QP50-6-18u-TO8 conectado en un circuito de amplificación con un amplificador operacional cuádruple LMC660CN que permite amplificar las señales para operar en un rango de 0-5 V. Las salidas de este circuito se conectan a las entradas analógicas de un microcontrolador Arduino UNO, el cual controla a dos *drivers* de micropasos TB6600, a los cuales se transmiten pulsos a través de sus entradas digitales.

El seguidor también cuenta con un control manual para los motores, compuesto por dos botones que activan los motores y un enchufe de palanca encargado de establecer la dirección en función de su estado. Este control también incluye una función de parada de emergencia, la cual puede ser activada en situaciones críticas mediante la presión simultánea de ambos botones, lo que resultará en la detención total del sistema. Además, el prototipo cuenta con un sistema de seguridad adicional, que incluye dos microinterruptores posicionados como límites de carrera encargados de detener el sistema para prevenir cualquier desalineación o posible daño.

2.2.1. Circuito amplificador de transimpedancia

El fotodiodo de cuatro cuadrantes utilizado para seguir la trayectoria del sol (Figura 2.2) tiene una eficiencia cuántica cuyo máximo está alrededor de 920 nm, por lo que se considera que la luz infrarroja es óptima para tener una mejor respuesta [40].

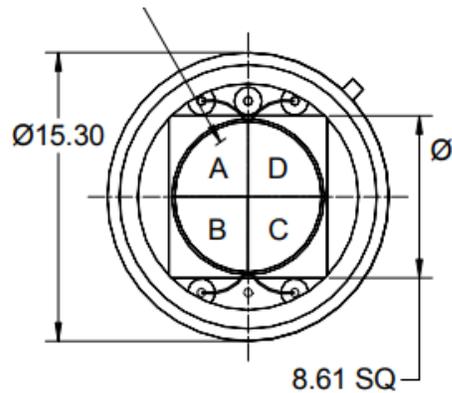


Figura 2.2. Diagrama del fotodiodo de cuatro cuadrantes QP50-6-18u-T08 [41].

Sin embargo, este dispositivo necesita rastrear la trayectoria del Sol, el cual tiene un espectro más amplio, que va desde el UV hasta el infrarrojo cercano, rango en el que el fotodiodo tiene sensibilidad. En cualquier caso, para adquirir la señal del fotodiodo, esta se debe acondicionar y amplificar. Para ello se utilizaron cuatro amplificadores operacionales de precisión con el objeto de llevar la señal a un rango de 0 a 5 VDC [40].

Cada uno de los cuadrantes del fotodiodo se asocia a un circuito amplificador de transimpedancia, como se muestra en la Figura 2.3, y cuyo funcionamiento se rige por la Ecuación 1. El amplificador de transimpedancia convierte las variaciones de corriente en variaciones de voltaje, lo que permite amplificar la corriente del fotodiodo (I_{ph}), la cual es proporcional a la irradiancia y depende del nivel de luz solar incidente.

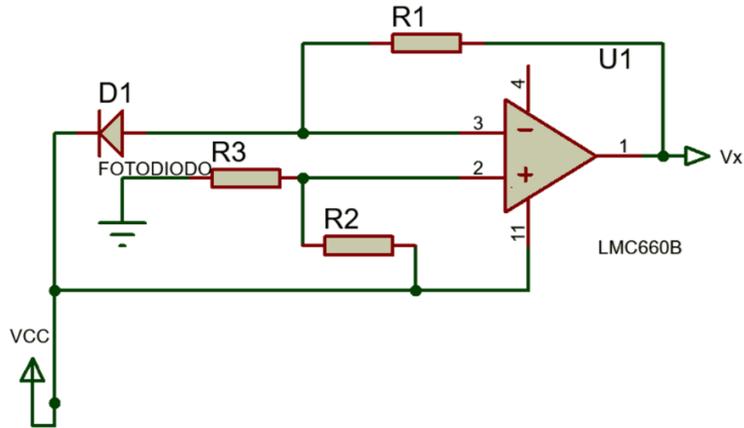


Figura 2.3. Circuito amplificador de transimpedancia de un cuadrante del fotodiodo.

$$V_x = V_{CC} \frac{R_3}{R_2 + R_3} - R_1 I_{ph} + V_{bias, x} + \varepsilon(t) \quad (1)$$

A continuación, se define cada término:

V_x : Representa la tensión en la salida del circuito para el cuadrante x del fotodiodo.

V_{CC} : Es la fuente de alimentación del circuito, que también proporciona una referencia de voltaje, mediante el puente divisor.

$\frac{R_3}{R_2 + R_3}$: Divisor de voltaje que proporciona el voltaje referencia en condiciones de ausencia total de luz.

R_1 : Resistencia de transimpedancia que proporciona amplificación de la fotocorriente del fotodiodo.

I_{ph} : Corriente fotogenerada por el fotodiodo, proporcional a la irradiancia y dependiente del nivel de luz.

$V_{bias, x}$ = Término de sesgo residual (*offset*) sistemático e inherente a cada etapa de amplificación.

$\varepsilon_x(t)$ = Representa el ruido electrónico aleatorio y fluctuante en el tiempo, que puede surgir de diversas fuentes, como interferencias electromagnéticas, variaciones ambientales (flujos de aire, temperatura, etc.).

Es importante destacar que el amplificador opera de tal manera que, si el fotodiodo recibe una mayor cantidad de luz, su nivel de voltaje disminuye, dado que la fotocorriente del fotodiodo fluye desde el ánodo hacia el cátodo común. La salida de tensión sigue entonces una proporcionalidad inversa, que se puede corregir posteriormente por *software* para propósitos de visualización, monitoreo y cálculo de error. Por ello, es necesario que, en ausencia de luz, la salida entregue el máximo de tensión, y gradualmente disminuya conforme la irradiancia aumenta.

Esta es la razón del divisor de tensión formado por las resistencias R2 y R3: cuando el fotodiodo se encuentra en completa oscuridad, la salida reproducirá idealmente el voltaje del puente, conectado a la entrada positiva del amplificador operacional (Ecuación 2).

$$V_{x, dark} = V_{cc} \frac{R_3}{R_2 + R_3} - V_{bias, x} + \varepsilon_x(t). \quad (2)$$

En la práctica el puente se ajusta de manera que, en ausencia de luz, la salida sea lo más cercana al valor máximo (5 VDC) aceptado por las entradas analógicas del convertidor analógico digital (ADC). Es preferible quedar un poco por debajo de este valor, para asegurarse de que no se opera en saturación de la entrada del ADC. En resumen, la introducción de este término sirvió como un *offset controlado* para asegurar que todos los cuadrantes iniciaran desde valores de referencia muy cercanos entre sí. Este término de referencia se puede sustraer sistemáticamente por *software* a todas las señales de los cuatro cuadrantes del fotodiodo, teniendo en cuenta que el término de sesgo $V_{bias, x}$, es propio de la etapa de amplificación de cada fotodiodo y se debe sustraer mediante caracterización experimental previa. Este término se obtiene caracterizando los cuadrantes en total oscuridad y adquiriendo las señales durante un período determinado. La varianza de estas lecturas representa el ruido aleatorio característico $\varepsilon_x(t)$.

Por otro lado, las resistencias de transimpedancia fueron determinadas mediante una prueba experimental con el objetivo aprovechar todo el rango dinámico del convertidor analógico digital (0 – 5 VDC, 1023 – 0 bits).

Posterior a este ajuste, y habiendo confirmado el correcto funcionamiento del circuito, se diseñó el circuito impreso (PCB) (ANEXO I) en el *software* Altium. El diseño se imprimió en una placa fenólica y se montaron los componentes electrónicos necesarios para que la placa pudiera ser asociada al microcontrolador Arduino UNO.

2.2.2. Pruebas de código de seguimiento y optimización de tiempo de iteración (*delay*)

El código base del sistema de seguimiento del prototipo fue desarrollado en su primera versión por Carlos Alfredo Rangel Reyes. Este código fue posteriormente modificado y probado de forma iterativa, para mejorar la funcionalidad y la precisión del seguimiento (ver ANEXO II).

A grandes rasgos, el código es un bucle *while* infinito que está continuamente adquiriendo las señales del fotodiodo de cuatro cuadrantes, calculado los errores de azimut y elevación; y enviando los registros a un servidor web donde son almacenados. Dentro del bucle *while* infinito están anidados dos modos de operación: manual y automático. El modo automático opera por defecto, mientras que el modo manual requiere activación por *hardware*, en este caso dos botones que activan el motor de azimut y elevación, y un interruptor que selecciona el sentido de giro. En modo manual se opera un motor a la vez.

Por el contrario, en modo automático, continuamente se evalúa, primeramente, si el nivel de luz está por encima de un mínimo, ya que, si este se encuentra por debajo, se asume que hay un exceso de nubosidad que hace que el seguidor se detenga. En caso de pasar esta evaluación, se asume que la radiación directa es suficiente para seguir la trayectoria solar, entonces se ejecuta una acción de control *on-off* con banda muerta: se verifica si los errores de elevación y azimut se encuentran por debajo de un umbral de error determinado. En caso contrario los motores se activan hasta que los errores caen debajo de esos niveles de umbral de error considerado aceptable. Este proceso se repite infinitamente a una cadencia ajustada por una función de retraso (*delay*) que se puede modificar a voluntad.

Este código comienza con la adquisición de las salidas de los circuitos de transimpedancia, que se conectan en las entradas analógicas (10 bits) del Arduino. Estos valores analógicos se asignan a variables *int* (signalA a signalD). Dado que las salidas del circuito están ubicadas en los pines A3 a A0 de la placa Arduino, se realizó la asignación en consecuencia. Además, se asignó el valor entero "sensorPin" al pin A4, que controla la dirección del motor.

Se declararon e inicializaron otros valores iniciales para las salidas digitales, entre los que se encuentran "dirEI" y "dirAZ" (12 y 11 respectivamente), "CLKe" y "CLKa" (7 y 6 respectivamente), y "enEL" y "enAZ" (10 y 9 respectivamente). Para una mejor comprensión de la operación del

código, se presenta en la Tabla 2.2 el nombre de las variables y su pin asignado en el microcontrolador Arduino UNO, así como la descripción de cada variable donde *IN* indica que es una variable de entrada y *OUT*, una variable de salida. Asimismo, para una visión más clara de la lógica de funcionamiento, se presenta el diagrama de flujo del código (Diagrama 2.2 a 2.5).

Tabla 2.2. Variables y pin asignado en el microcontrolador Arduino UNO.

Nombre	Pin en Arduino	Descripción
signalA	A3	<i>IN</i> , señal del cuadrante A
signalB	A2	<i>IN</i> , señal del cuadrante B
signalC	A1	<i>IN</i> , señal del cuadrante C
signalD	A0	<i>IN</i> , señal del cuadrante D
sensorPin	A4	<i>IN</i> , señal del <i>switch</i> que controla la dirección del motor en modo manual
dirEL	12	<i>OUT</i> , dirección del motor de elevación
dirAZ	11	<i>OUT</i> , dirección del motor de azimut
enEL	10	<i>OUT</i> , habilita el motor de elevación
enAZ	9	<i>OUT</i> , habilita el motor de azimut
CLKe	7	<i>OUT</i> , reloj de elevación
CLKa	6	<i>OUT</i> , reloj de azimut
redbutton	2	<i>IN</i> , señal del botón que habilita el motor de azimut con el control manual
greenbutton	3	<i>IN</i> , señal del botón que habilita el motor de elevación con el control manual
limitE2	13	<i>IN</i> , señal del límite de carrera 2 de elevación
limitA2	8	<i>IN</i> , señal del límite de carrera 2 de azimut
limitE1	5	<i>IN</i> , señal del límite de carrera 1 de elevación
limitA1	4	<i>IN</i> , señal del límite de carrera 1 de azimut
prom	Interna	Promedio de la señal de los cuatro cuadrantes
dl1	Interna	Cálculo de error para el ángulo de elevación
dl2	Interna	Cálculo de error para el ángulo azimut
cld	Interna	Valor asignado para identificar la presencia de nubes
EP	Interna	Error máximo permitido (banda muerta del control <i>on-off</i> 0 - EP)

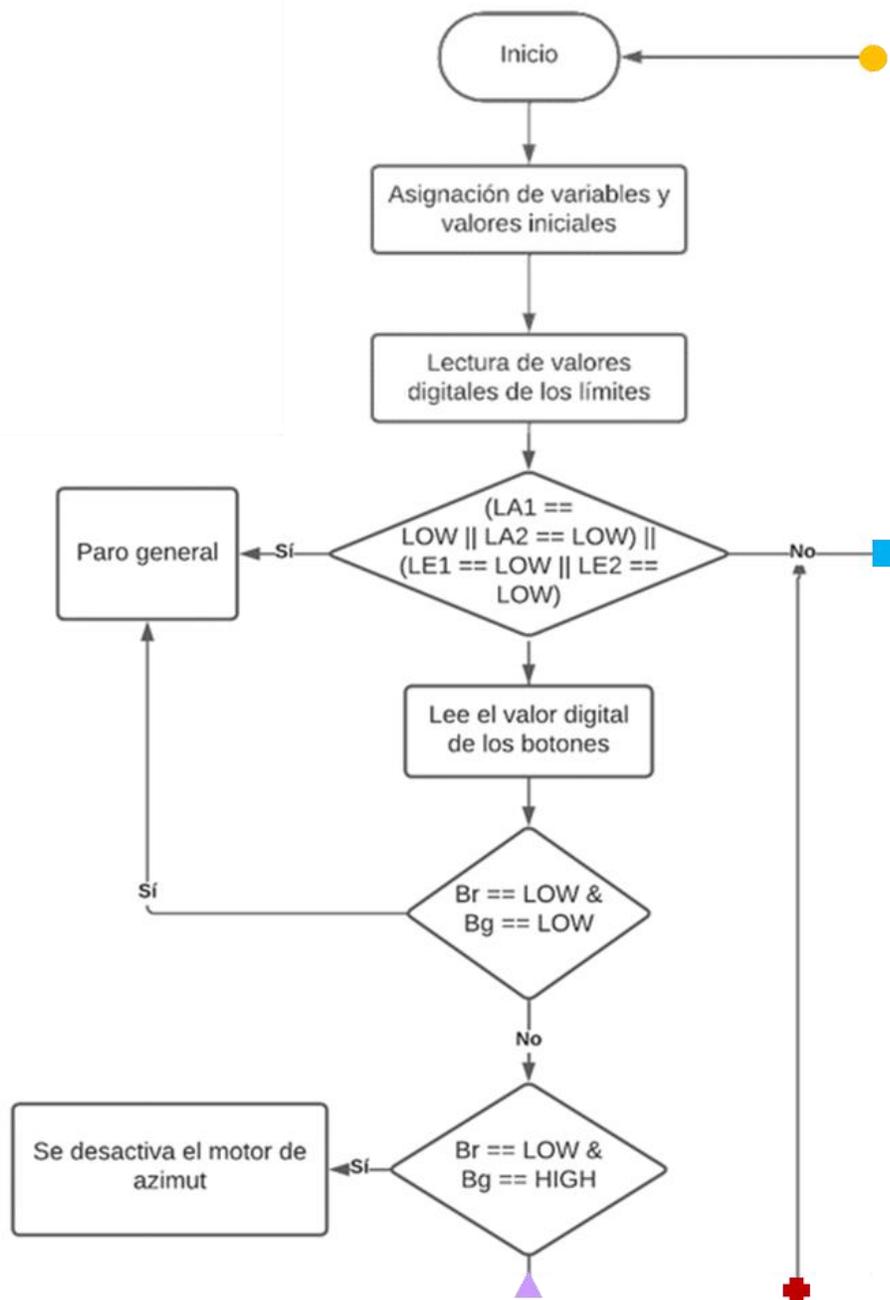


Diagrama 2.2. Funcionamiento del código de Arduino.

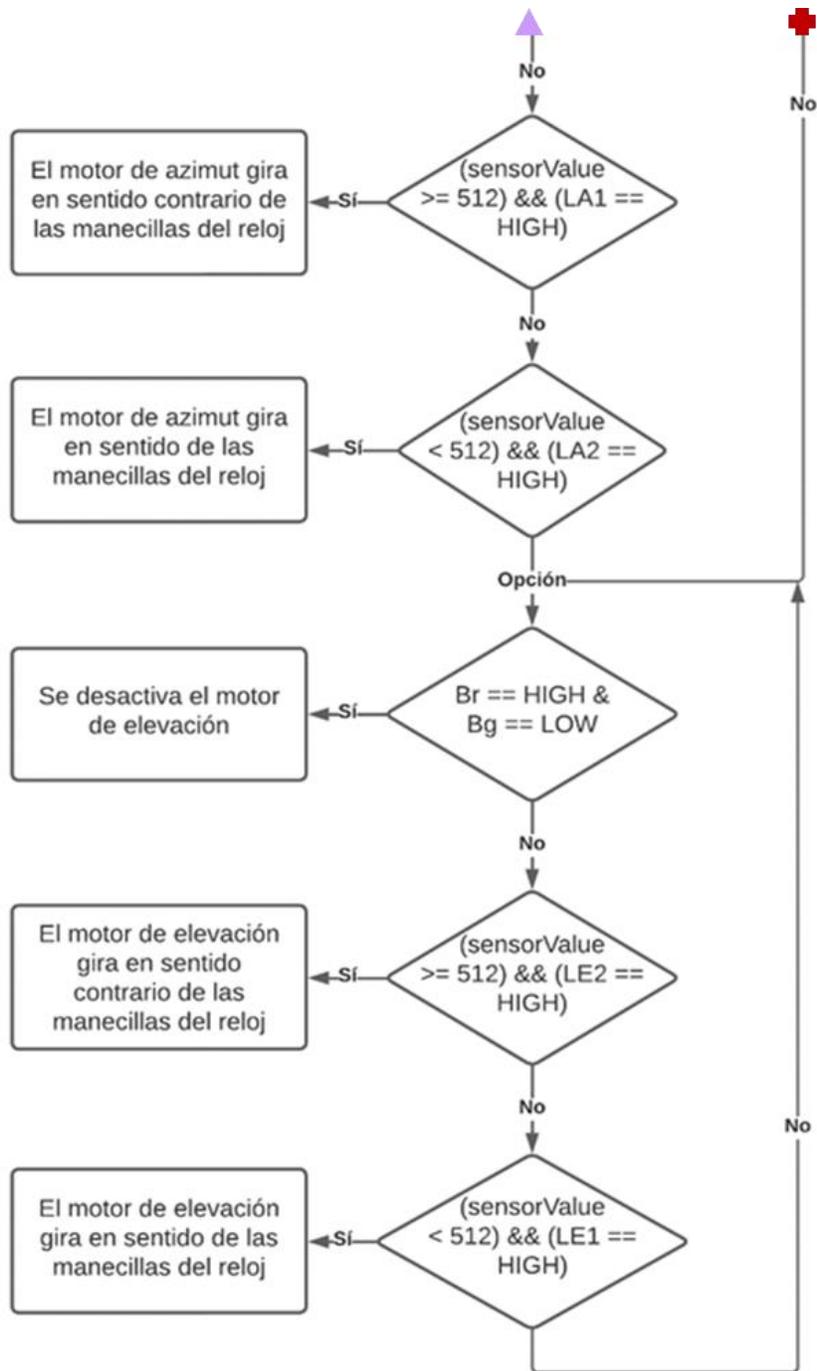


Diagrama 2.3. Continuación de Diagrama 2.2.

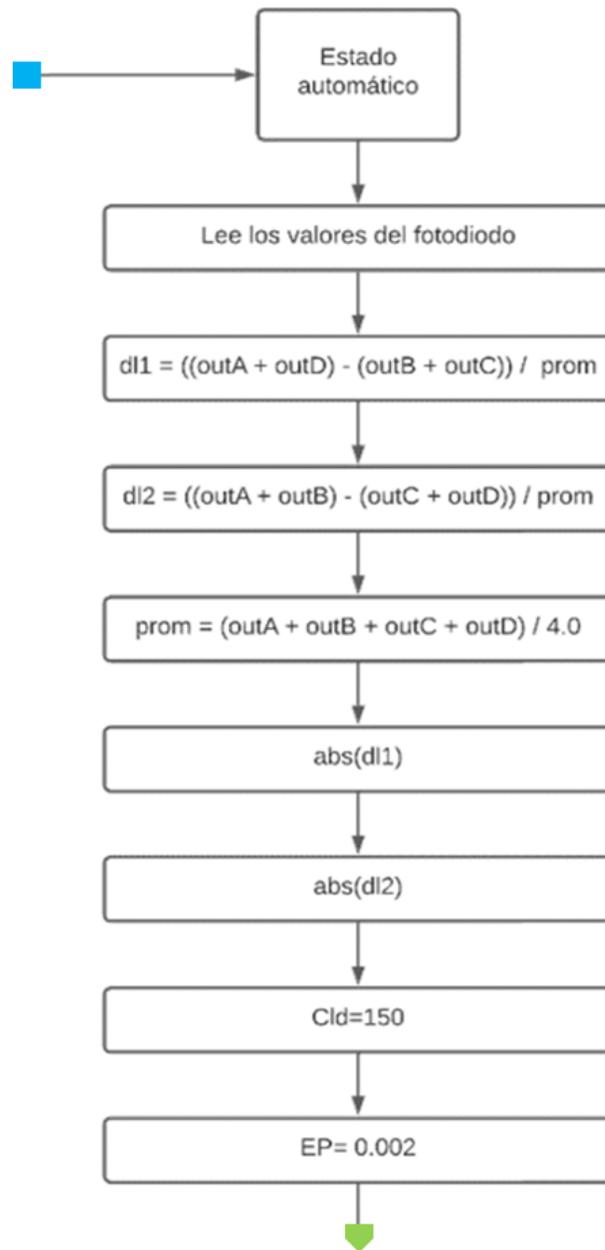


Diagrama 2.4. Continuación de Diagrama 2.2.

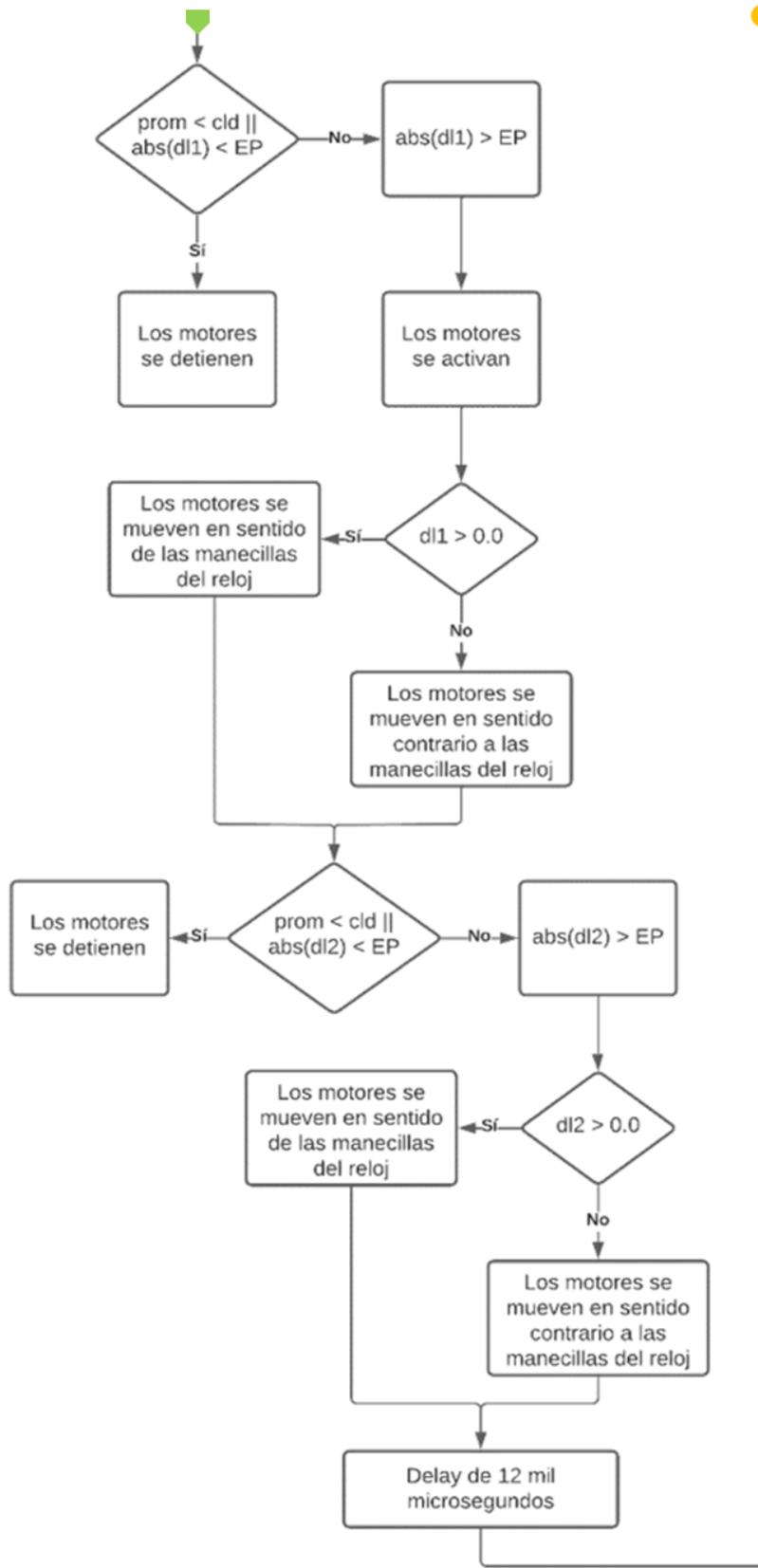


Diagrama 2.5. Continuación de Diagrama 2.2.

Los pines 2 y 3 fueron asignados como entradas digitales para los botones que activan el control manual de los motores. También se asignó una variable tipo *char*, llamada “rot” que contiene el valor inicial del *switch case* (none) y otras entradas para los microinterruptores de fin de carrera que detendrán los motores cuando los ángulos alcancen sus límites.

Las entradas del microinterruptor se leen en el programa principal, donde la condición *if* indica que, si se presiona uno de los interruptores, el programa cambia el estado a "s", como en el caso del interruptor general donde se sostienen los botones, el cual indica un paro general del sistema de seguimiento como se señala en la primera condición del Diagrama 2.2. Si este no es el caso, el estado permanece "n", lo que indica que el sistema continuará en modo automático.

Las condiciones para la selección de caso (*case*) son las siguientes: si el estado de “Br” (botón rojo) es “LOW”, es decir, está presionado, y el de “Bg” (botón verde) es “HIGH”, no presionado, se activará el caso "a" para controlar manualmente el motor azimutal; de lo contrario, si “Bg” es “LOW” (está presionado) y “Br” es “HIGH” (no está presionado), el estado se cambiará a "e" para controlar manualmente el motor de elevación; el tercer caso asignado ("s") es activado cuando ambas entradas son “LOW”, es decir, “Br” y “Bg” están presionados, lo que provocará una parada general de emergencia que detendrá los motores y ambos controles se desactivarán hasta que se reinicie el microcontrolador.

El estado predeterminado del *switch case* consiste en operar el control automático de los motores, generando correcciones en respuesta a las lecturas de los fotodiodos y a los errores calculados de azimut y elevación. En efecto, las entradas analógicas de los fotodiodos se registran inicialmente en las variables Out_A a Out_D y se utilizan las siguientes Ecuaciones (3 y 4) para calcular la dirección de ambos ejes, donde *prom* es el promedio de la señal de los cuatro cuadrantes del fotodiodo; este valor también se utiliza para establecer un umbral por debajo del cual se considera que no hay luz suficiente, ya sea por horario o nubosidad, lo que desactiva el control automático hasta que las condiciones de irradiancia se restablezcan. .

Error de elevación

$$dl1 = ((Out_A + Out_B) - (Out_C + Out_D)) / (prom) \quad (3)$$

Error del azimut

$$dl2 = ((Out_A + Out_D) - (Out_B + Out_C)) / (prom) \quad (4)$$

Como se observa en el Diagrama 2.5, las condiciones *if* para el control automático por un lado tienen la función de habilitar los motores cuando el promedio de los valores de los cuadrantes supera un umbral definido en la variable "cld," que indica la presencia de nubes; y, por otro lado, evalúan si los errores de azimut y elevación están por encima del error permitido (EP), cuyo valor define la banda muerta del control *on-off*. Además, estas condiciones permiten corregir la dirección en sentido de las manecillas del reloj cuando el error (dl1 o dl2) es mayor que cero, y también realizan correcciones en sentido contrario a las manecillas del reloj cuando el error es menor que cero, lo que garantiza un seguimiento preciso y eficiente del sistema.

Por otro lado, para seleccionar el valor de *delay* en el código de Arduino, el cual determina la frecuencia de ejecución y de adquisición del código, se analizaron los datos recopilados en la plataforma web durante una prueba de monitoreo del error. Durante este proceso, se observó que este parámetro afectaba la dispersión del error de seguimiento en ambos ejes. Se realizaron tres experimentos para evaluar la disminución del ruido y determinar el valor óptimo, utilizando los valores mostrados en la Tabla 2.3 para las pruebas.

Tabla 2.3. Valores para pruebas de delay.

Prueba	Periodo (Horas del día)	Valor de <i>delay</i> (microsegundos)
1	12:00:00 - 14:06:30	7,000
2	14:07:00 - 14:40:30	10,000
3	14:46:00 - 15:06:30	12,000

2.2.3. Montaje

El *hardware* del sistema se ensambló debajo de la estructura del prototipo. Este equipo es suministrado por una fuente de alimentación de doble salida de 14V, una de ellas alimenta los controladores y el circuito amplificador, mientras que la otra suministra al microcontrolador. Los controladores de los motores a pasos se instalaron debajo de la base superior del prototipo, mientras que en la sección inferior se instaló la fuente de alimentación y una placa de conexiones para los botones y los interruptores de límites de carrera.

Por otro lado, se instaló un gabinete plástico en la parte superior del prototipo, a la altura de la lente. Ésta alberga el circuito amplificador, el Arduino y el módulo ESP32-WROOM-32, el cual está conectado al Arduino mediante el pin digital 1, con dos resistencias en serie de 10 y 4.7 kΩ desde el pin 16 del módulo ESP32. Se establecieron conexiones para las tierras y la alimentación,

que proviene del puerto de voltaje de salida de 5V del Arduino al módulo. El propósito principal de este módulo es transmitir la información de las salidas digitales a una plataforma web desarrollada por el equipo de instrumentación del Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Esta plataforma posibilita el monitoreo en tiempo real y la recopilación de datos relacionados con las variables de interés del sistema, como se detalla en el apartado 2.5. La transmisión de datos se realiza mediante conexión *Wi-Fi*. Adicionalmente, se han integrado botones para el control manual y microinterruptores de fin de carrera que permiten establecer los límites de los ejes.

2.3. Calibración del paso mínimo de los motores a pasos

Con el propósito de caracterizar con exactitud la resolución de los pasos de los motores del seguidor solar, se estableció un punto inicial tanto en el arco correspondiente al ángulo de elevación como en la base para el ángulo en azimut. Posteriormente, se implementaron códigos específicos para cada ángulo (consultar ANEXO III y IV), de manera independiente, los cuales instrúan al motor a avanzar 20 mil pasos. El Diagrama 2.6 detalla el diagrama de flujo de los códigos utilizados para llevar a cabo esta caracterización.

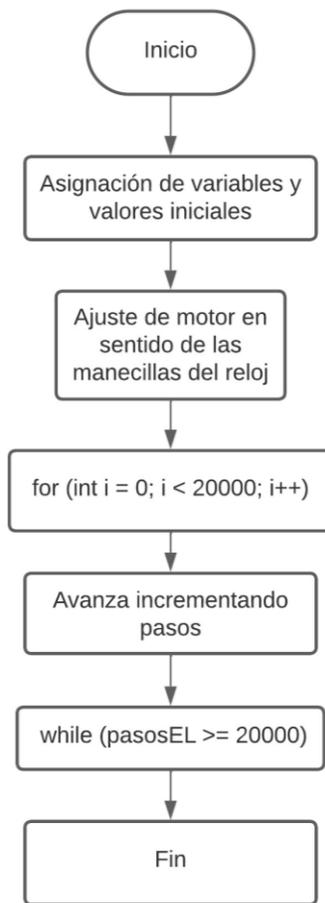


Diagrama 2.6. Instrucciones del código para caracterizar los ángulos.

Una vez recorrida la distancia asociada al número de pasos, se llevaron a cabo mediciones precisas de distancia recorrida “DiR” y de radio (h). Esta disposición se ilustra de manera gráfica en la Figura 2.4.

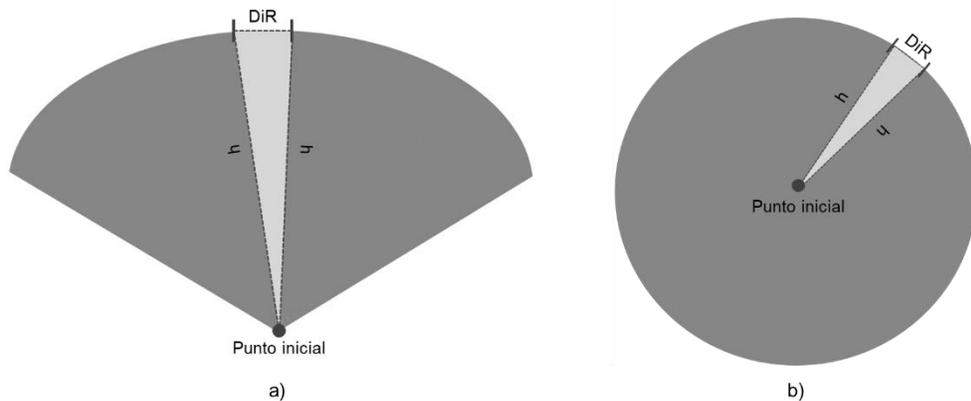


Figura 2.4. Representación de toma de medidas para calcular el ángulo por pasos.

A partir de estas mediciones, se calculan los ángulos utilizando trigonometría, aplicando la Ecuación 5. Para obtener los coeficientes de ángulo/paso para cada eje, se dividió el ángulo recorrido entre el número de pasos avanzados (20 mil), como se describe en la Ecuación 6.

$$\theta = 2\sin^{-1} \frac{DiR/2}{h} \quad (5)$$

$$AnxP = \frac{\theta}{20000} \quad (6)$$

Utilizando esta información sobre los grados por paso, se ajustó el número de pasos necesario para determinar el desplazamiento del seguidor durante el barrido angular, procedimiento descrito en la sección 2.4.

2.4. Caracterización del sistema de seguimiento

La caracterización de un sistema de seguimiento es de gran importancia debido a que esto permite evaluar su rendimiento en términos de precisión, exactitud y estabilidad, para que de esta manera se pueda tener una visión clara de cómo funciona el sistema en diferentes condiciones y qué tan confiable es en la tarea de seguimiento. Adicionalmente, esto permitirá evaluar la precisión de los resultados obtenidos por el sistema de seguimiento y ayudará a establecer limitaciones y restricciones.

2.4.1. Corrección de inhomogeneidad de cuadrantes del fotodiodo

Con el fin de estimar el nivel de ruido electrónico se llevó a cabo una prueba donde el sistema se expuso al sol y se recolectaron un total de 500 lecturas durante 125 segundos (código en ANEXO V) con el fotodiodo descubierto y a incidencia normal, sin la tapa del gabinete, con el propósito de asegurar que todos los cuadrantes recibieran una cantidad uniforme de rayos solares. El código utilizado en esta prueba se basó en las instrucciones detalladas en el Diagrama 2.7. Estas instrucciones establecen que la adquisición se inicia cuando ambos botones del control manual son presionados simultáneamente. Una vez iniciado, las lecturas y cálculos derivados de ellas se imprimen en el monitor serial hasta alcanzar los 500, con un *delay* de 250 microsegundos entre cada medición.

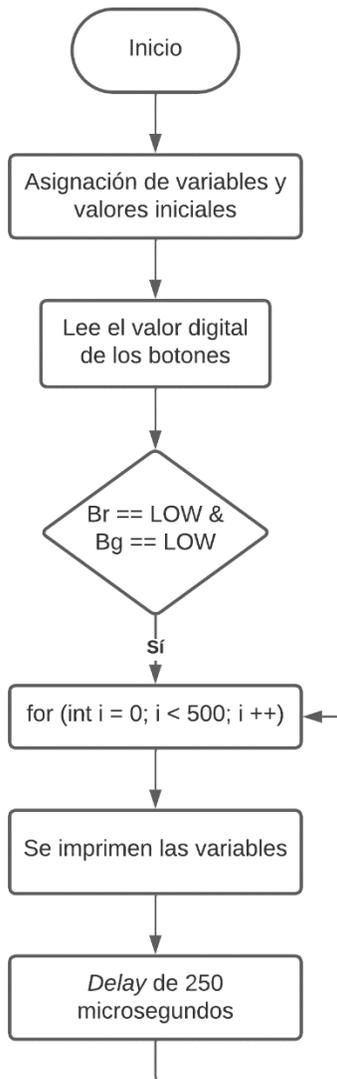


Diagrama 2.7. Instrucciones del código para recopilar datos.

Los datos obtenidos se transmitieron desde el Arduino al monitor serial del *software* Arduino IDE por conexión USB, y posteriormente fueron analizados para cuantificar el ruido electrónico presente en las señales de los cuadrantes, así como la diferencia de sensibilidad entre ellos. En efecto, idealmente, los cuatro cuadrantes del fotodiodo son idénticos, por lo que, a irradiancias iguales, deben dar la misma lectura. En la práctica, existen pequeñas diferencias entre ellos. Estas diferencias se pueden cuantificar y corregir a partir de las lecturas mencionadas, que parten de la premisa de que la irradiancia fue idéntica durante la prueba (día despejado, sin nubes, a incidencia normal). Es importante destacar que se utilizó el cuadrante A (elección arbitraria, pues no se calibra para flujo luminoso) como referencia para calcular los coeficientes de los otros tres

cuadrantes (Ecuación 7), que posteriormente se utilizan en todos los códigos que realizan lecturas de los cuadrantes, siguiendo las Ecuaciones 8 y 9.

$$C_{inh,x} = average \left(\sum \frac{photodiodo_A}{photodiodo_x} \right) \quad (7)$$

$$Out_A = (señal\ del\ cuadrante\ A) - V_{bias,A} \quad (8)$$

$$Out_x = ((señal\ del\ cuadrante\ X) - V_{bias,x}) * C_{inh,x} \quad (9)$$

2.4.2. Caracterización de los cuadrantes del fotodiodo mediante un barrido bidimensional y obtención del error del sistema de control

Con el fin de lograr una calibración precisa de la respuesta angular del sensor, se propone una metodología basada en un barrido controlado alrededor del punto óptimo de seguimiento. Esto implica el desarrollo de un código (ver ANEXO VI) en el *software* Arduino que instruye al sistema a realizar un barrido en un plano bidimensional (ejes azimutal y de elevación) de 13x11 puntos, como se muestra en la Figura 2.5. De acuerdo con las indicaciones del código y como se evidencia en los Diagramas 2.8 y 2.9 que presenta dichas instrucciones, los motores de azimut y elevación avanzan en saltos discretos de 700 y 300 pasos, respectivamente, y en cada punto del *grid* resultante se recopilan los datos de cada cuadrante, su promedio y los errores de elevación y azimut.

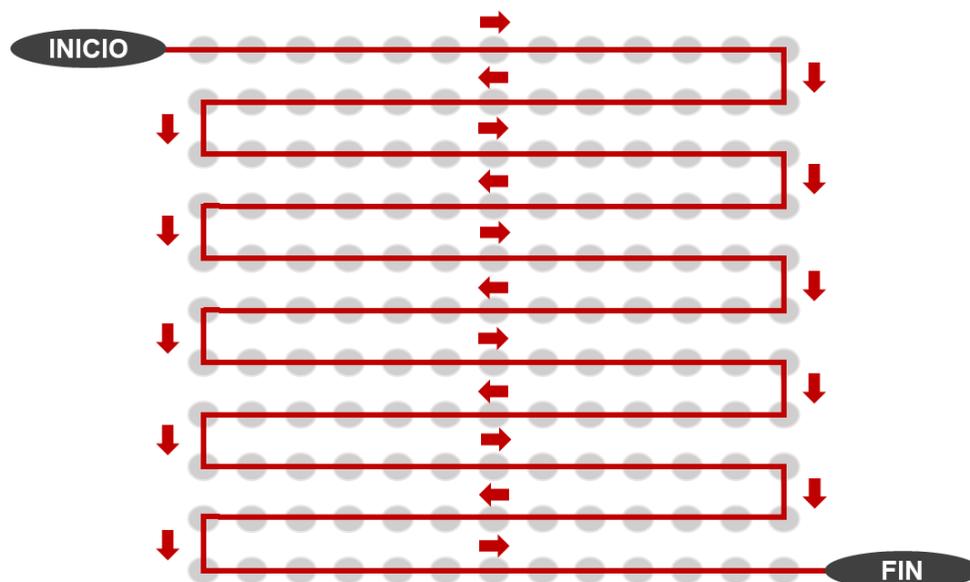


Figura 2.5. Patrón seguido en el barrido.

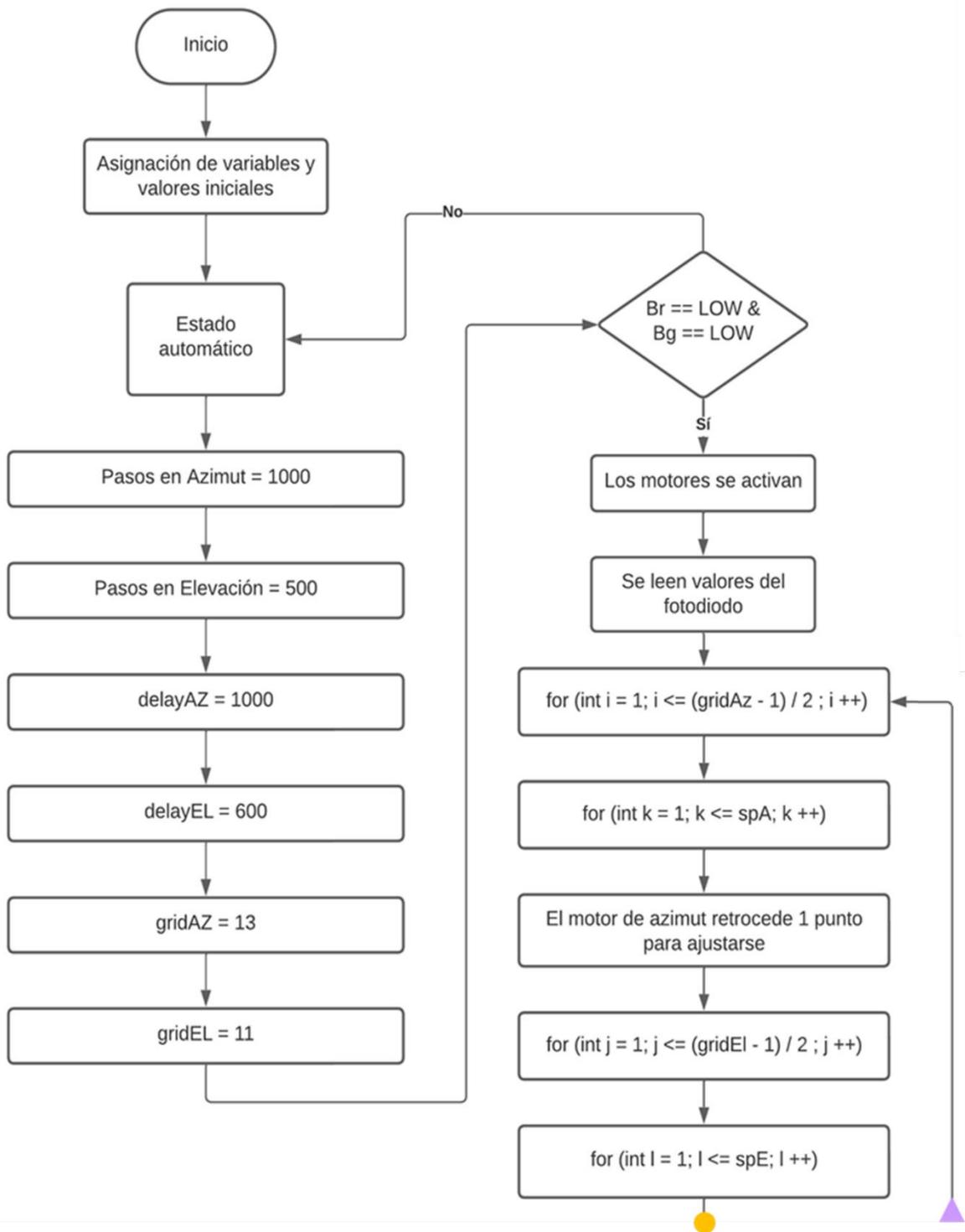


Diagrama 2.8. Instrucciones del código para el barrido.

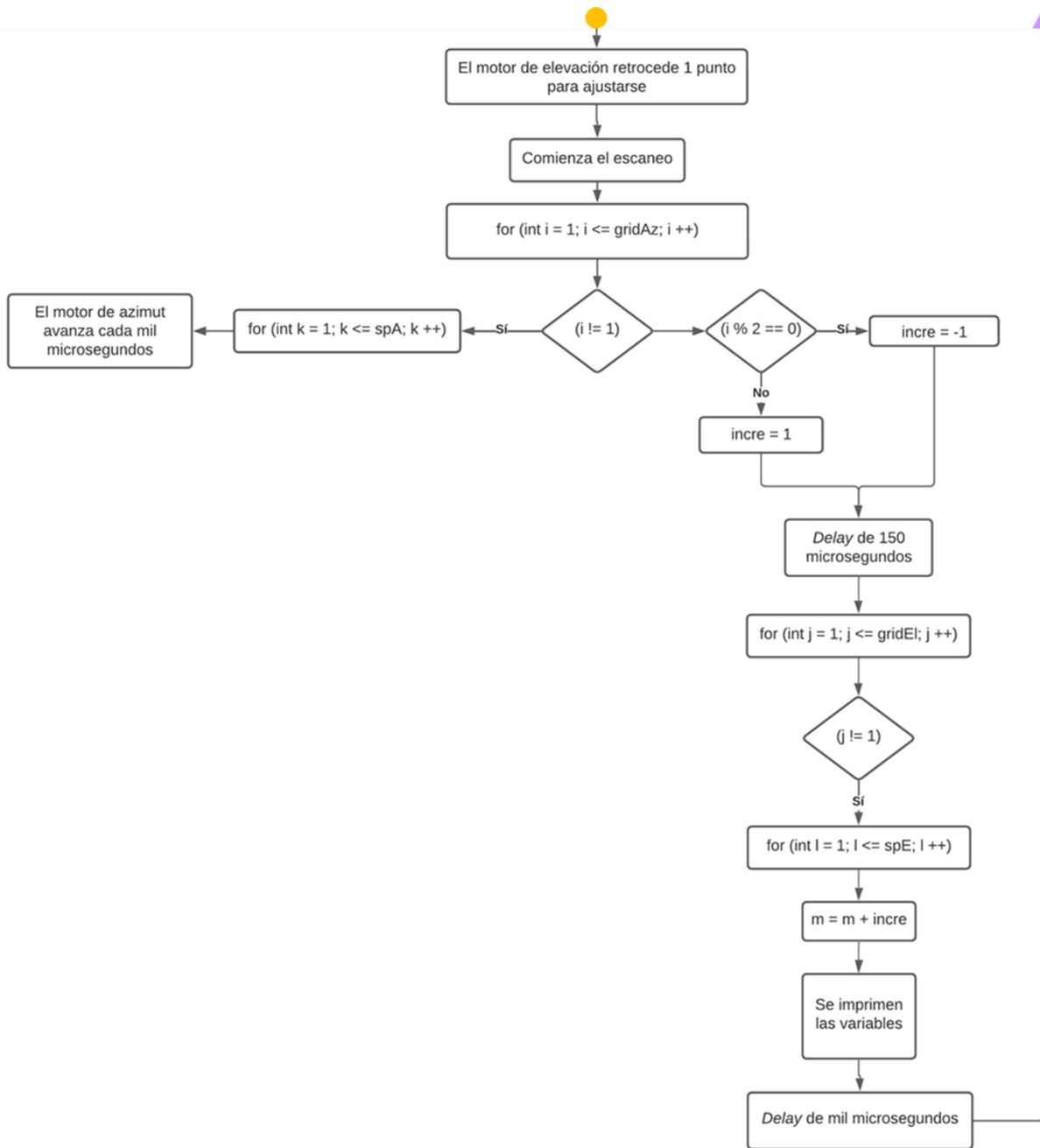


Diagrama 2.9. Continuación de las instrucciones del código para el barrido.

Este procedimiento tiene como punto de partida (punto central del *grid* de barrido) un punto de operación con error mínimo de lazo cerrado. La posición adecuada se verifica también contrastando que el punto de seguimiento automatizado coincida con el punto lineal perfectamente centrado en el receptor lineal como se muestra en la Figura 2.6. Esto se ajusta finamente con una base *tip-tilt* sobre la cual está montado el conjunto sensor-controlador.

Una vez posicionado correctamente, se presionan los dos botones del control manual para dar comienzo al barrido alrededor del punto de mínimo error. En tiempo real, los datos se envían al monitor serial del *software* Arduino a través del cable USB conectado entre el microcontrolador y la computadora. Los datos obtenidos se procesaron posteriormente con un programa específicamente diseñado en LabVIEW para este propósito (ver ANEXO VII), a fin de observar y analizar gráficamente los resultados.



Figura 2.6. Concentración de rayos solares sobre la base disipadora debido a la lente Fresnel.

Se generaron mapas individuales para cada cuadrante, un mapa obtenido de la desviación estándar de los cuadrantes en conjunto y mapas de error correspondientes a los ángulos de azimut y elevación, que revelan el comportamiento del error en relación con los ángulos, seguidos de su representación gráfica. A partir de estas representaciones gráficas, se obtuvieron los coeficientes de los errores de azimut y elevación vs. los ángulos del barrido, esenciales para la calibración del desempeño del sistema de control de seguimiento solar. Los coeficientes se obtienen de las pendientes de las líneas de tendencia ajustadas de los mapas de error, y se utilizaron para calibrar los errores normalizados (Ecuaciones 3 y 4, que no tienen unidades) a grados, dividiendo el error normalizado adimensional entre la pendiente de la línea de tendencia, según lo mostrado en la Ecuación 10.

$$\text{Error en grados} = \frac{\text{Error normalizado}}{\text{Coeficiente de error}} \quad (10)$$

2.5. Monitoreo del seguidor solar

Se realizó un monitoreo en condiciones reales de operación automática, en exterior, de las siguientes variables:

- Cuadrantes del fotodiodo (A, B, C y D).
- Promedio de los cuadrantes.
- Errores (dl1 y dl2).
- Estado de los límites de carrera.

Para esto se llevaron a cabo pruebas en un entorno al aire libre durante aproximadamente cuatro horas, donde el sistema fue posicionado sobre una superficie plana. En esta configuración, el prototipo se dejó funcionar en modo automático y los datos generados fueron transmitidos en intervalos de 30 segundos a través del módulo ESP32-WROOM-32 hacia la plataforma web mencionada anteriormente, de donde fueron extraídos y representados gráficamente.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1. Ensamblado

El ensamblado final del seguidor cuenta con un área de captación de 60x8 cm en la base disipadora de calor, la cual cuenta con dos adaptadores de manguera modelados por computadora y fabricados mediante impresión 3D usando filamento PLA (ácido poliláctico) implementados en los extremos de ésta como se observa en la Figura 3.1, donde también se muestra el diseño del adaptador de manguera creado mediante modelado computacional, junto con una vista desde el interior una vez que ha sido instalado en la base disipadora. Estos adaptadores permiten la entrada y salida del agua refrigerante con el fin de recuperar el fluido caliente y aprovecharlo en otros procesos adicionales. A su vez, el seguidor tiene integrado un sistema de enfriamiento activo por agua el cual comprende la base disipadora mencionada anteriormente, una bomba CC de 18W y dos mangueras conectadas a los adaptadores de manguera de la placa por donde fluye el agua de un extremo al otro, recolectando el calor absorbido por la base.

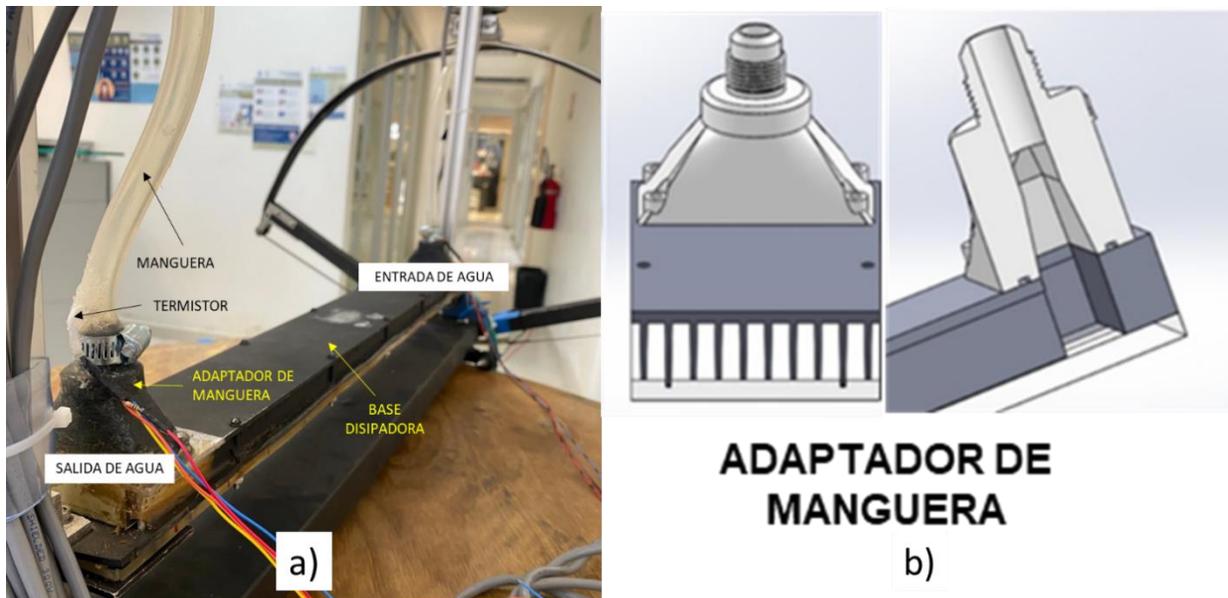


Figura 3.1. a) Parte inferior del seguidor solar. b) Diseño del adaptador de manguera creado mediante modelado computacional.

El prototipo también incorpora dos ejes de seguimiento motorizados, cuyo funcionamiento depende de la cantidad de fotones captados por los segmentos del fotodiodo. La corrección de estos ángulos es realizada mediante la rotación de un motor a pasos, tanto en el arco como sobre la base circular, elementos mostrados en la Figura 3.2. Para ajustar con precisión estos ángulos, se ha implementado una pesa que equilibra la carga con el peso del soporte de la lente. Además, se ha dispuesto una cinta alrededor de la base del sistema, incluyendo el arco, lo que facilita que el prototipo gire y ajuste sus ángulos de manera efectiva.

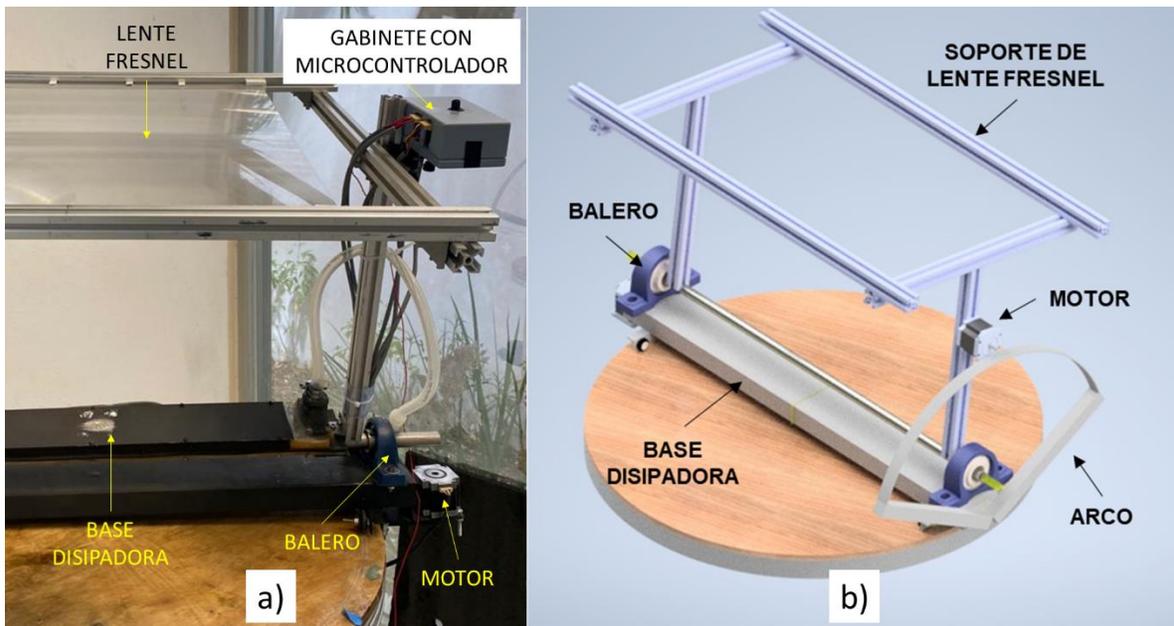


Figura 3.2. a) Prototipo del seguidor solar. b) Diseño modelado por computadora del seguidor solar.

Ya teniendo el prototipo ensamblado, se realizaron pruebas preliminares para verificar la funcionalidad del sistema de seguimiento en su modo de operación por defecto, el control automático. Una vez encendido, el sistema inicia de inmediato buscando minimizar los errores de azimut y elevación, mediante el movimiento de los motores a pasos, que no se detendrán hasta que ambos errores caigan por debajo del umbral de la banda muerta (EP, error permitido).

Es importante recordar aquí que el sistema tiene dos alineamientos en la práctica: el del conjunto lente de Fresnel-receptor y el del sensor angular de irradiancia. Para asegurar que los vectores normales a los planos de ambos sistemas son iguales (alineación perfecta entre ambos), se ajusta la platina *tip-tilt* sobre la que descansa el sensor de irradiancia ubicado en el gabinete hasta que

el punto de operación del sistema coincide con el haz lineal perfectamente centrado en el receptor como se puede observar en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Prototipo en operación.

3.2. Optimización del sistema de seguimiento (Mecánica, Electrónica y de Código)

En esta sección se abordará el diseño del circuito operacional, destacando los ajustes realizados para garantizar la amplificación adecuada de la señal del fotodiodo; la experimentación para determinar el valor de *delay* óptimo, elemento que influye en la reducción del ruido electrónico y mejora la precisión del seguimiento solar; y el montaje del *hardware*, describiendo la disposición física de los componentes.

En la Figura 3.4 se presenta el diagrama electrónico general del sistema de control del seguidor solar, donde se muestran las interconexiones entre los diversos bloques y el Arduino UNO. Se observa la vinculación del fotodiodo al circuito de amplificación, enlazado a su vez con la fuente de alimentación y las entradas analógicas y tierra del Arduino. La interfaz de control manual y los límites de eje se conectan en la placa del interruptor de entrada, la cual establece conexiones

con las entradas digitales del microcontrolador. Los motores de elevación y azimut se vinculan a los controladores (*drivers*), los cuales a su vez se conectan al Arduino. Por último, la tarjeta de transmisión de datos ESP32-WROOM-32 se enlaza mediante un puente de resistencias a la salida digital 1.

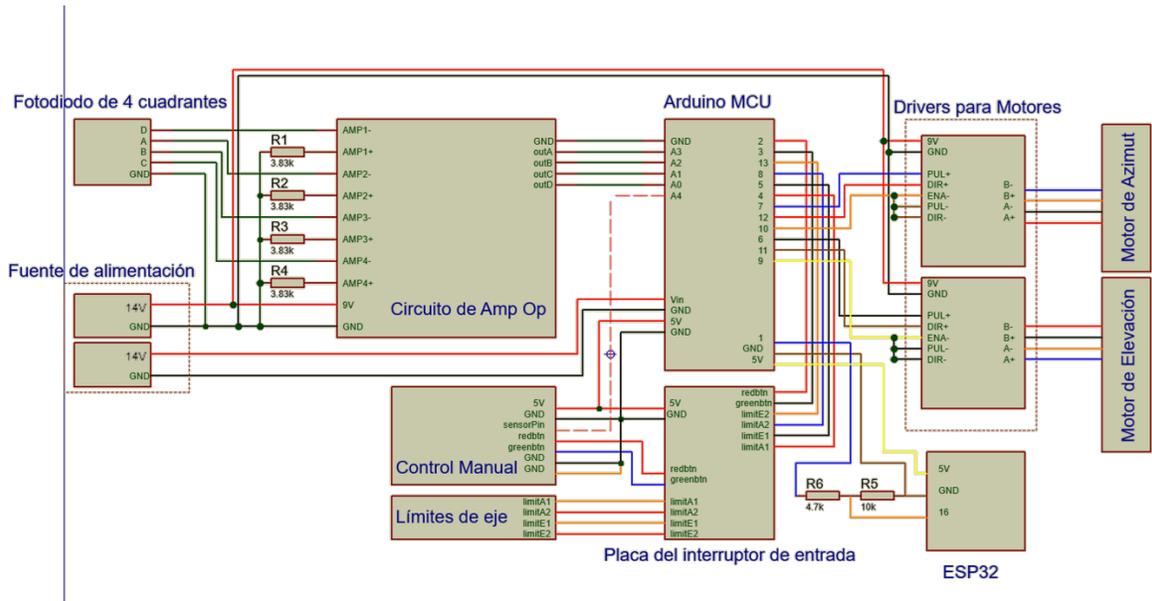


Figura 3.4. Diagrama electrónico general del sistema de control de seguimiento solar.

El fotodiodo utilizado se conectó a un circuito de amplificación con un amplificador LMC660CN, que aumenta las señales para obtener un valor cercano a 5V. Estas señales amplificadas se transmitieron a las entradas analógicas del microcontrolador Arduino UNO, que carga el algoritmo responsable del control del sistema de seguimiento solar. Este microcontrolador también se encarga de enviar la señal de los valores obtenidos a la tarjeta de transmisión de datos ESP32 que está conectada a este mediante un puente de resistencias con valores de 10kΩ y 4.7kΩ a la salida digital 1; de enviar los pulsos digitales generados a los *drivers* de micropasos TB6600, permitiendo así el ajuste de los ejes del sistema según sus configuraciones, y de recibir la señal de los límites de eje y del control manual.

El sistema de control manual está compuesto por dos botones y un interruptor de palanca que indica la dirección de movimiento de los motores. En particular, cuando el interruptor se encuentra en la posición "on" el sistema se desplaza en sentido contrario a las manecillas del reloj; mientras que en la posición "off", el movimiento se produce en sentido de las manecillas del reloj. La función de parada de emergencia, activada mediante la presión simultánea de ambos botones, garantiza

una detención inmediata del sistema en situaciones críticas. Además, la inclusión de microinterruptores como límites de carrera refuerza aún más la seguridad del sistema al prevenir posibles desalineaciones o daños potenciales. En la Figura 3.5 se detallan las conexiones del control manual al microcontrolador donde se muestra que el interruptor que indica la dirección de ajuste del motor está conectado a la entrada analógica A4. Asimismo, se presenta la disposición de conexión de los botones del control manual a las entradas digitales 2 y 3. Por otro lado, en esta misma figura se muestran las conexiones de los límites de carrera, conectados en serie con una resistencia de $1k\Omega$ cada uno a la fuente de alimentación de 14V.

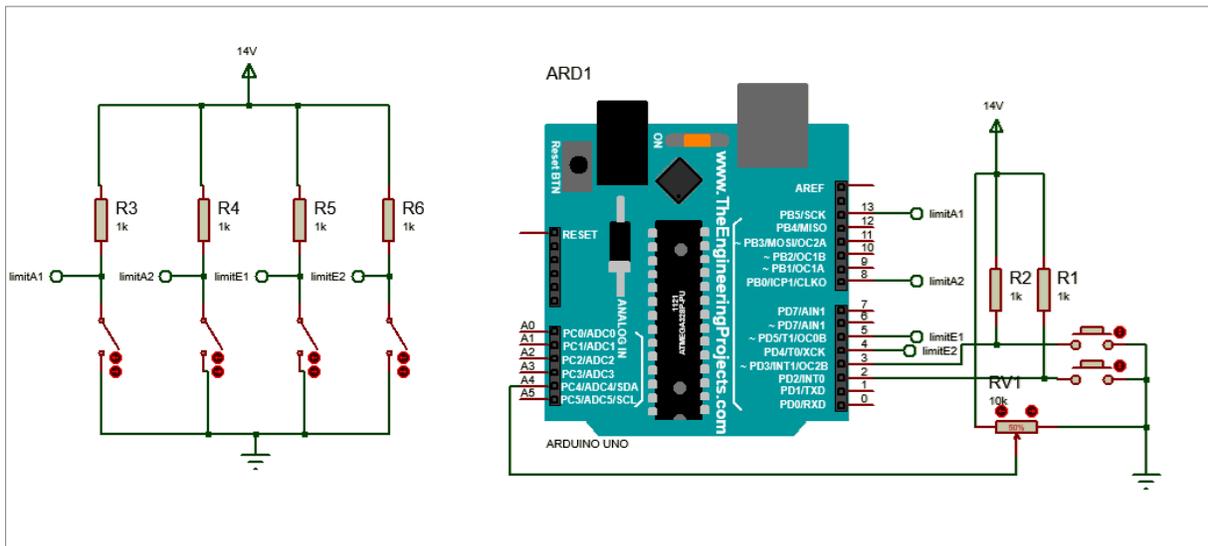


Figura 3.5. Esquema conexiones del control manual e interruptores de fin de carrera y su conexión al microcontrolador.

3.2.1. Circuito amplificador de transimpedancia

En el circuito amplificador de transimpedancia se ajustaron las resistencias de retroalimentación (responsables de la ganancia del amplificador) y las del puente divisor de voltaje que proporciona la referencia de salida en condiciones de oscuridad. Este ajuste garantiza un valor óptimo cercano a 750-800 bits en los cuadrantes del fotodiodo, para una irradiancia promedio típica de un día despejado.

En la Figura 3.6 se presenta el esquema detallado del circuito amplificador de transimpedancia y su conexión al microcontrolador. Aquí se muestra la conexión establecida entre cada cuadrante del fotodiodo con las entradas analógicas del microcontrolador. Para este circuito se emplea un amplificador LMC660CN para procesar las señales del fotodiodo. Cada entrada del amplificador

se conecta a un cuadrante específico del fotodiodo a través de una resistencia de $1.5\text{k}\Omega$ en paralelo con un capacitor de 1nF y la entrada positiva del amplificador se conecta mediante un puente de resistencias compuesto por valores de $4.7\text{k}\Omega$ y $3.83\text{k}\Omega$ proporcionando la referencia de salida.

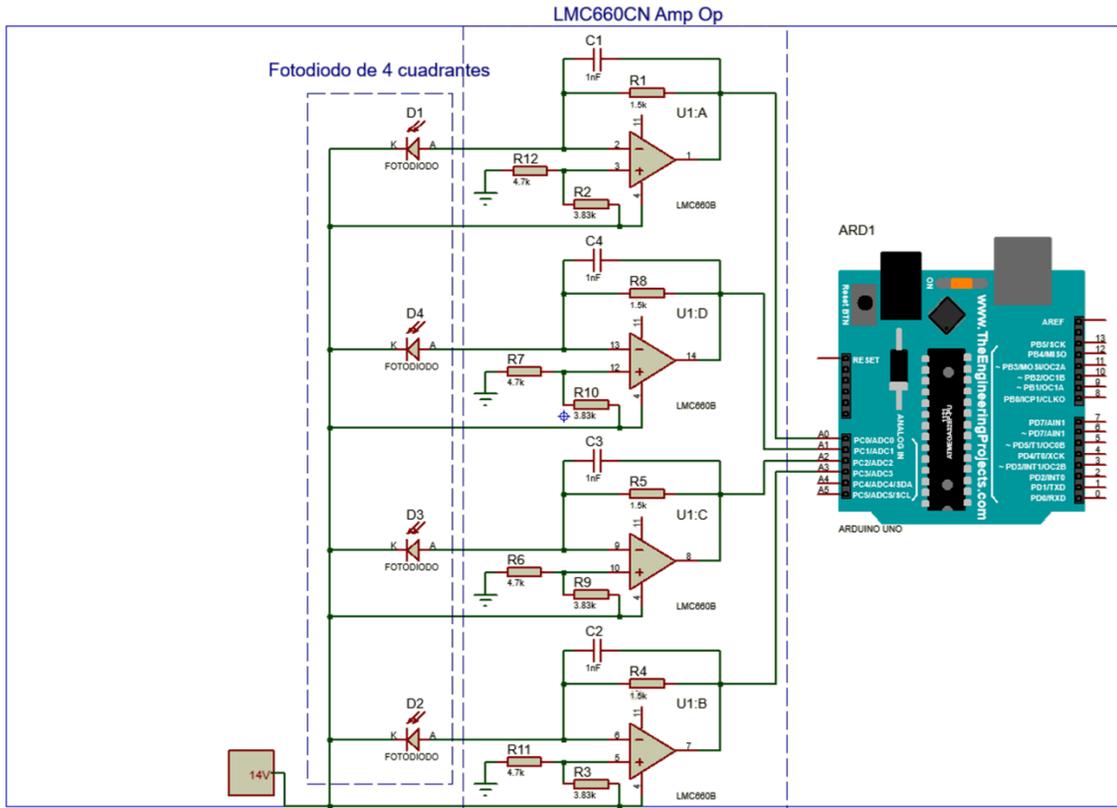


Figura 3.6. Esquema detallado del circuito amplificador de transimpedancia y su conexión al microcontrolador.

El diseño y la implementación del circuito impreso (PCB) (Figura 3.7) fueron etapas fundamentales en el proceso de integración del circuito con el Arduino UNO. El diseño en el *software* Altium y la posterior implementación en una placa fenólica permitieron una integración perfecta del circuito con los componentes electrónicos necesarios, lo que disminuyó el ruido electrónico y mejoró la estabilidad del sistema en su conjunto, con respecto a la versión anterior del circuito.

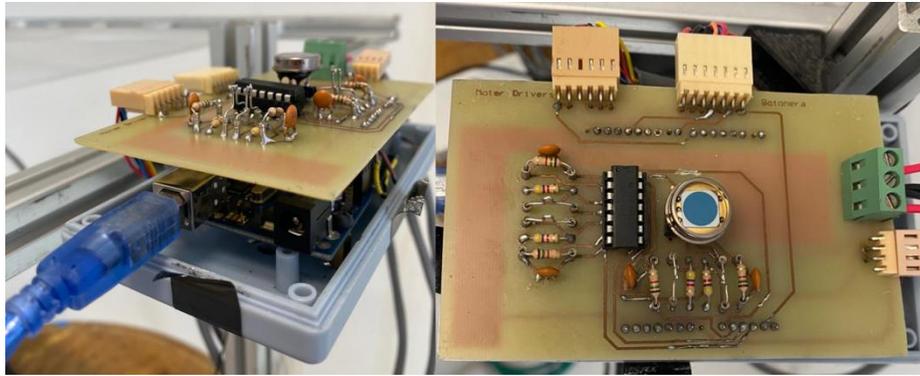


Figura 3.7. Circuito de amplificación en PCB.

También es importante señalar que, a diferencia de la metodología más empleada tradicionalmente, que suele utilizar lentes para proyectar y redimensionar el disco solar sobre la zona activa del sensor, y filtros para seleccionar la luz infrarroja (por ejemplo, Díaz *et al.*); en este estudio no se implementaron ni lentes ni filtros ópticos, en un afán de mantener el diseño lo más simple y lo menos costoso posible.

En cambio, se optó por emplear un domo con un orificio sobre el fotodiodo a manera de un tragaluz (Figura 3.8) de 6.3 mm de diámetro, que proyecte la silueta circular del orificio sobre el fotodiodo de cuadrantes el cuál a su vez tiene una zona activa de diámetro de 7.98 mm. Esta relación de diámetros permite un contraste importante en la intensidad detectada en el rango dinámico angular del conjunto sensor. El domo fue colocado con precisión para asegurar que la luz del círculo luminoso se proyecte de forma equitativa entre los cuatro cuadrantes del fotodiodo en incidencia normal de la irradiancia. La altura del tragaluz es un parámetro importante, dando mayor sensibilidad angular a mayor altura, pero a costa de la nitidez del círculo luminoso proyectado, que se difumina a mayores alturas por efecto de la difracción de los bordes del orificio. De forma práctica, no optimizada, se decidió usar una altura de 27 mm, cercana a la altura del domo. El interior del domo se pintó con aerosol negro mate, para minimizar las posibles reflexiones parásitas de las paredes internas del domo hacia el fotodiodo.

Ante los inevitables errores de colocación, error en la circularidad del tragaluz, e inhomogeneidad de los fotodiodos, se optó por colocar el conjunto en una base *tip-tilt* de precisión (modelo KM100B/M, marca Thorlabs). En efecto, el ajuste fino *tip-tilt* permite hacer coincidir el plano del conjunto lente de Fresnel–receptor con el plano del conjunto tragaluz-fotodiodo, compensando los defectos y falta de homogeneidad del sistema. De esta forma la dirección normal de ambos

planos coincidirá con la dirección de los rayos de irradiancia directa, en condiciones de seguimiento óptimo por parte del sistema de control.

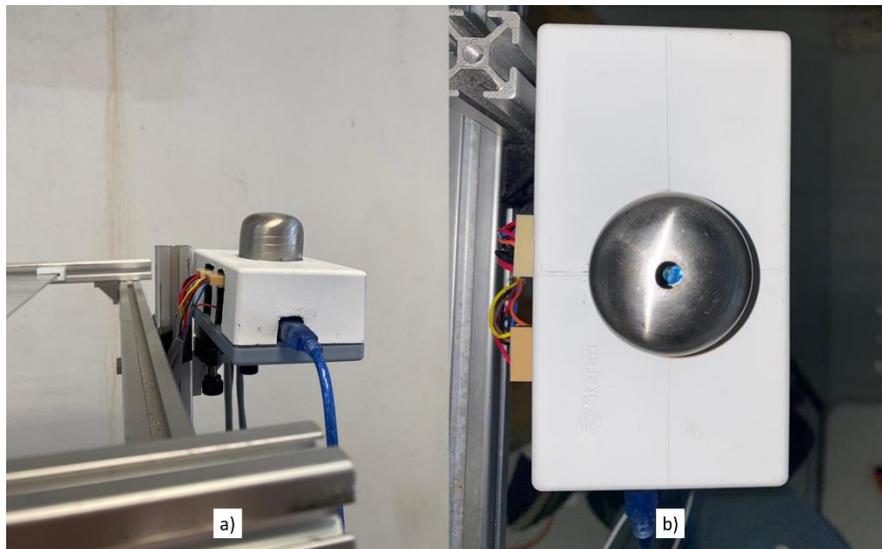


Figura 3.8. Gabinete con el domo. a) Vista lateral. b) Vista superior.

Aquí es importante detenerse en un aspecto poco evidente pero que explica el desempeño del sistema de control: Nótese que el sensor, su circuito de transimpedancia, y las entradas del ADC del microcontrolador están físicamente muy cercanas entre sí, minimizando todas las longitudes de conductores que transmiten las señales analógicas, que además están rodeados por un plano de tierra. Todo dentro del mismo gabinete. No hay una sola señal analógica que se conduzca por cables externos.

Esta fue una estrategia deliberada, de buenas prácticas de diseño de PCB's y de instrumentación, con el propósito de minimizar el ruido electrónico. En efecto, los cables que salen del gabinete son todos correspondientes a otras señales, digitales todas, que son más inmunes y robustas al ruido e interferencias externas.

3.2.2. Pruebas de código de seguimiento y optimización de tiempo de iteración (*delay*)

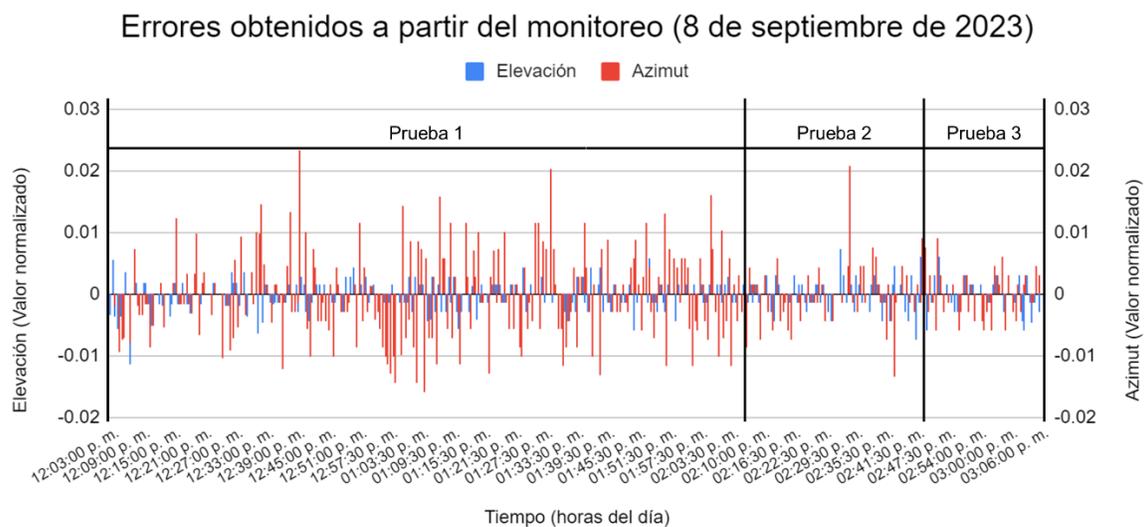
El código de seguimiento solar (control automático por defecto, manual por *hardware* y monitoreo inalámbrico por plataforma web) fue probado en múltiples ocasiones, lo que permitió mejorarlo iterativamente hasta lograr un seguimiento estable y preciso, asegurado por la versión final que

se encuentra en el ANEXO II. Uno de los parámetros más importantes fue el *delay*, el tiempo entre repeticiones del ciclo *while* infinito, que corresponde igualmente a la tasa de muestreo de las señales de los cuadrantes. Este parámetro se ajustó de forma manual: demasiado corto provoca oscilaciones sostenidas de los ejes, y muy grande exhibe un tiempo de respuesta demasiado lento por parte de los motores. Alrededor de las decenas de microsegundos se encontró un buen compromiso que se ajustó con mayor precisión, como se muestra en la Tabla 3.1, que utiliza la dispersión del error de seguimiento como parámetro a minimizar para encontrar el *delay* óptimo.

Tabla 3.1. Resultados de variación de *delay*.

Prueba	Periodo (horas del día)	Delay (microsegundos)	Desviación estándar del error normalizado (A.U.)
1	12:00:00 - 14:06:30	7,000	0.014791153
2	14:07:00 - 14:40:30	10,000	0.003733061
3	14:46:00 - 15:06:30	12,000	0.002862295

Se puede observar que el valor de 12,000 microsegundos exhibe la menor desviación estándar, por lo que se seleccionó este valor para el *delay* final. Por encima de este valor no se observaron mejoras y se pierde tiempo de respuesta. La gráfica correspondiente a estos datos (Gráfica 3.1) muestra claramente cómo el error disminuye a medida que aumenta el valor del *delay*, respaldando la elección del valor óptimo para mejorar la precisión del sistema.



Gráfica 3.1. Errores de elevación y azimut (medido en valores normalizados, antes de su conversión a grados).

Otros parámetros de importancia son el umbral de la banda muerta del sistema de control (EP) que se ajustó a un valor de 0.002 que equivale a un error cercano a 1 bit de resolución del ADC del microcontrolador Arduino UNO. Dicho valor asegura una minimización del error, y el sistema de control no exhibió inestabilidad ante este ajuste fino. Por otra parte, otro parámetro de importancia es el valor promedio asociado a la condición umbral de nubosidad (cld). Este ajuste merece una optimización más profunda, pero para efectos de este estudio se utilizó un valor de 150. Por debajo de este valor de umbral para el promedio de los cuadrantes, el seguimiento automático se desactiva, los motores se detienen, en espera de mejores condiciones de irradiancia directa.

En resumen, el desarrollo del código fue exitoso, logrando minimizar el error del sistema de control de seguimiento en ambos ejes.

3.2.3. Montaje

El ensamblaje del *hardware* del seguidor se llevó a cabo con éxito, proporcionando una base sólida para su funcionamiento efectivo. Los controladores del motor (*drivers*) se colocaron debajo de la base superior del prototipo (Figura 3.9, a). Se eligió esta ubicación para aprovechar el espacio disponible dentro del diseño del prototipo.

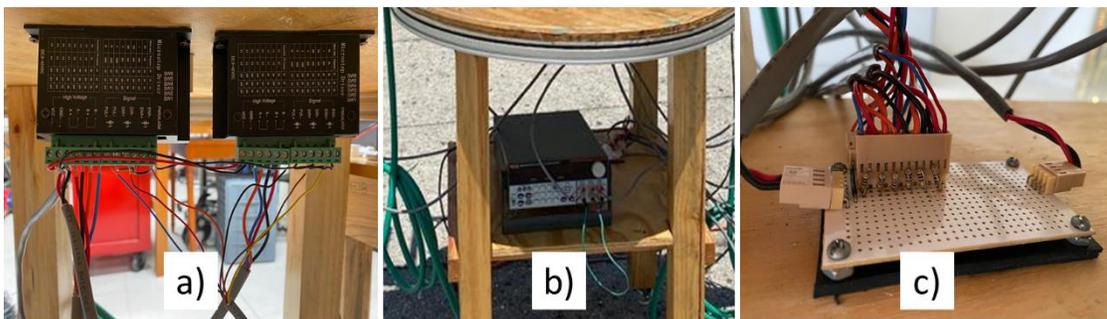


Figura 3.9. a) Controladores del motor. b) Fuente de alimentación. c) Placa de botones.

También se incorporó un gabinete de plástico en la parte superior del prototipo, cuidadosamente posicionada para estar al nivel de la lente Fresnel. Esta disposición fue estratégica, ya que no solo permitió optimizar el seguimiento solar, sino que también contribuyó a una utilización más eficiente del espacio. El gabinete alberga el circuito amplificador del fotodiodo de cuadrantes, el microcontrolador Arduino UNO y el módulo ESP32-WROOM-32 (Figura 3.10).

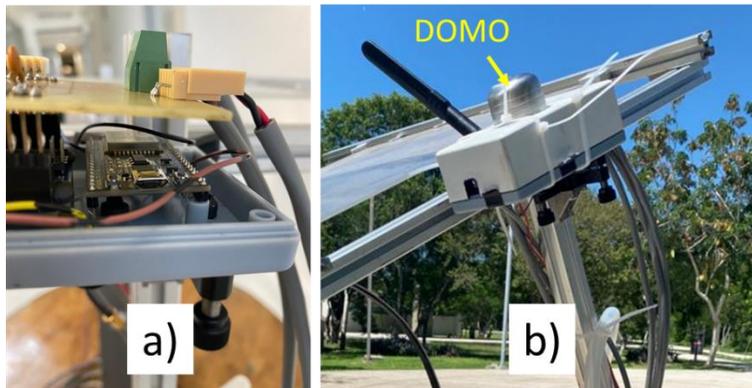


Figura 3.10. a) ESP32-WROOM-32 en el interior del gabinete b) Gabinete en operación.

Por otro lado, la inclusión de botones para el control manual (Figura 3.11, a) aportó al seguidor un control preciso y protección, ya que como se mencionó anteriormente, estos botones también actúan como un mecanismo de paro de emergencia cuando se presionan simultáneamente; así como los microinterruptores ubicados en cada límite de eje, que cuando son alcanzados se activa un paro general que puede ser desactivado al reajustar el sistema con el control manual para salir del límite.

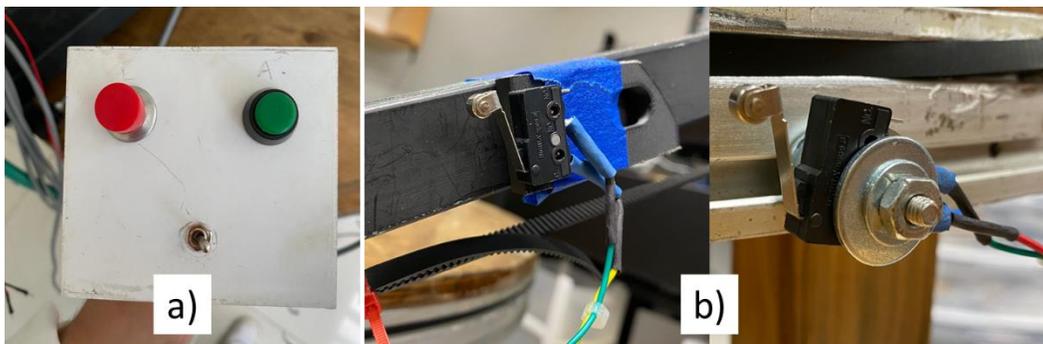


Figura 3.11. a) Control manual. b) Microinterruptores.

3.3. Calibración del paso mínimo de los motores a pasos

Para iniciar la caracterización de los ángulos, se procedió primero a determinar el ángulo por paso generado por los motores, tanto en la elevación como en el azimut. Mediante la implementación de la metodología establecida y utilizando los resultados obtenidos, se obtuvo que el motor de

elevación avanza a razón de 7.12×10^{-4} grados/paso, mientras que el motor de azimut avanza a razón de 9.87×10^{-4} grados/ paso (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Caracterización de resolución angular de los pasos de los motores.

Ángulo	DiR (cm)	h (cm)	Coefficiente (grados/paso)
Elevación	12	35	7.12×10^{-4}
Azimut	9.8	39.5	9.87×10^{-4}

Esta información se utilizó para ajustar la cantidad de pasos necesarios para determinar el desplazamiento del seguidor durante el procedimiento de barrido angular.

3.4. Caracterización del sistema de seguimiento

Esta sección presenta los resultados de las pruebas realizadas siguiendo la metodología detallada en el capítulo anterior, con el propósito de analizar a fondo el desempeño del sistema y comprender su comportamiento en situaciones variables. Estos resultados son esenciales para la evaluación crítica y la mejora continua del sistema de seguimiento.

3.4.1. Corrección de inhomogeneidad de cuadrantes del fotodiodo

Para asegurar un seguimiento preciso del sistema, fue fundamental lograr una calibración precisa del fotodiodo a través de una serie de pruebas. Inicialmente, se llevó a cabo una evaluación para eliminar cualquier posible ruido electrónico que pudiera afectar la calidad de las señales. Durante esta fase, se recolectaron 500 datos con el fotodiodo expuesto al sol y para identificar y cuantificar el ruido presente en las señales de los cuadrantes, así como las ligeras diferencias entre fotodiodos. Como resultado, se obtuvieron coeficientes individuales consignados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Coeficientes individuales.

B	C	D
1.00096	1.00085	1.0074

Por otra parte, el termino de sesgo residual ($V_{bias,x}$), se obtiene haciendo lecturas en completa oscuridad, cubriendo el sensor con una cubierta completamente opaca. Estas lecturas se consignan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores medidos del término de sesgo residual $V_{bias,x}$.

$V_{bias,A}$	$V_{bias,B}$	$V_{bias,C}$	$V_{bias,D}$
27	28	25	26

Ambas correcciones, coeficientes y $V_{bias,x}$, se integraron en el código del sistema, garantizando de esta manera lecturas precisas, lo que asegura un funcionamiento confiable en distintas condiciones.

3.4.2. Caracterización de los cuadrantes del fotodiodo mediante un barrido bidimensional y obtención del error del sistema de control

Con los cuadrantes del fotodiodo debidamente calibrados utilizando los coeficientes y la compensación de sesgo residual, cuyos datos se analizaron en el programa de LabVIEW (ANEXO VII), se generaron los mapas individuales de las lecturas de cada cuadrante (Figura 3.12) en función de la posición angular alrededor del punto de error mínimo.

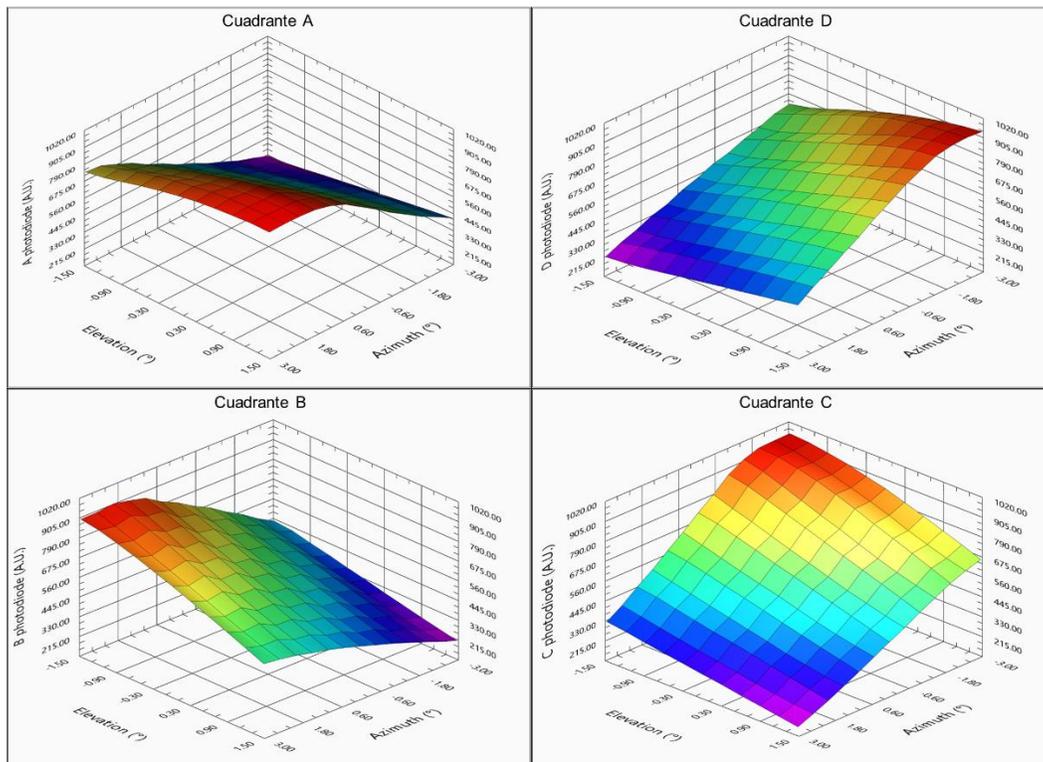


Figura 3.12. Mapas de barrido de los cuadrantes del fotodiodo.

En los mapas de la Figura 3.12 se puede apreciar cómo los máximos y mínimos están dispuestos de manera inversa, con A y C en oposición, al igual que D y B. Esta disposición refleja un excelente ajuste de rango dinámico, ya que los máximos se acercan al valor máximo de 1024 bits, mientras que los mínimos se aproximan a cero. Adicionalmente, la respuesta de los cuadrantes es lineal alrededor del punto óptimo de seguimiento, donde el error es mínimo. Este equilibrio en la distribución de la sensibilidad demuestra una calibración óptima, fundamental para calcular los errores de manera precisa en el sistema.

Asimismo, en la Figura 3.13 se muestra el mapa que refleja la desviación estándar combinada de los cuadrantes y el mapa de promedios. Dado que la desviación estándar se utiliza para medir la variabilidad o dispersión de los datos con respecto a un valor medio, un valor mínimo en la desviación estándar sugiere que los datos están más concentrados y cercanos al valor medio, nótese que la dispersión es mínima en el punto central del barrido bidimensional. Esto indica que el sistema ha logrado una detección precisa en esa ubicación específica, lo que se traduce en una alineación óptima del fotodiodo con el sol. Por otro lado, en el mapa de promedios (Figura 3.13, b) se observa que los cuatro cuadrantes se encuentran a un mismo nivel con valores cercanos a 600, mantenido en una meseta alrededor del punto de error mínimo, lo que garantiza un régimen lineal para la región de interés, a saber alrededor del punto de seguimiento óptimo.

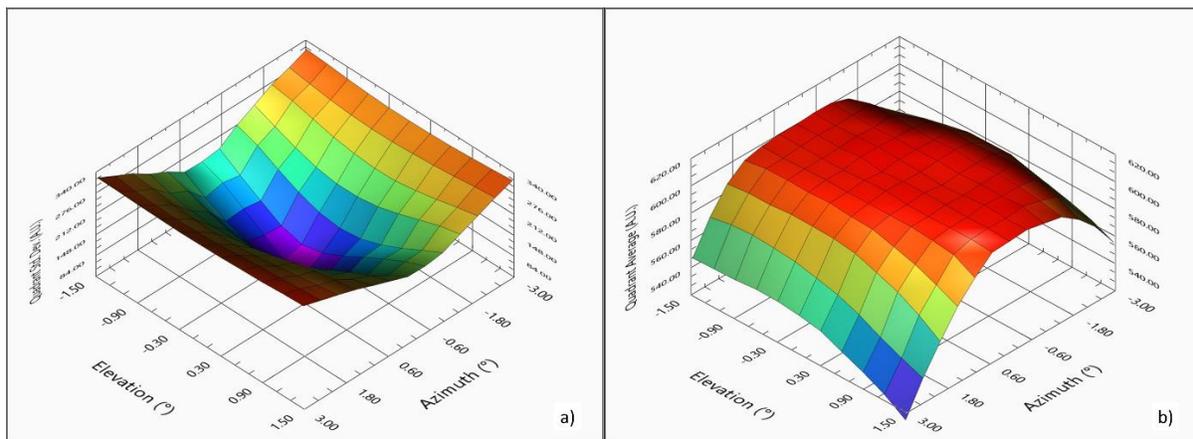


Figura 3.13. a) Mapa de desviación estándar de los cuatro cuadrantes. b) Mapa del promedio de los cuatro cuadrantes.

También se obtuvieron los mapas de error absoluto (valor absoluto, en escala logarítmica) de azimut (Figura 3.14) y de elevación (Figura 3.15), que revelan el comportamiento de los errores

en relación con el barrido angular, mostrando nuevamente marcadas regiones de error mínimo siguiendo cada uno el ángulo propio.

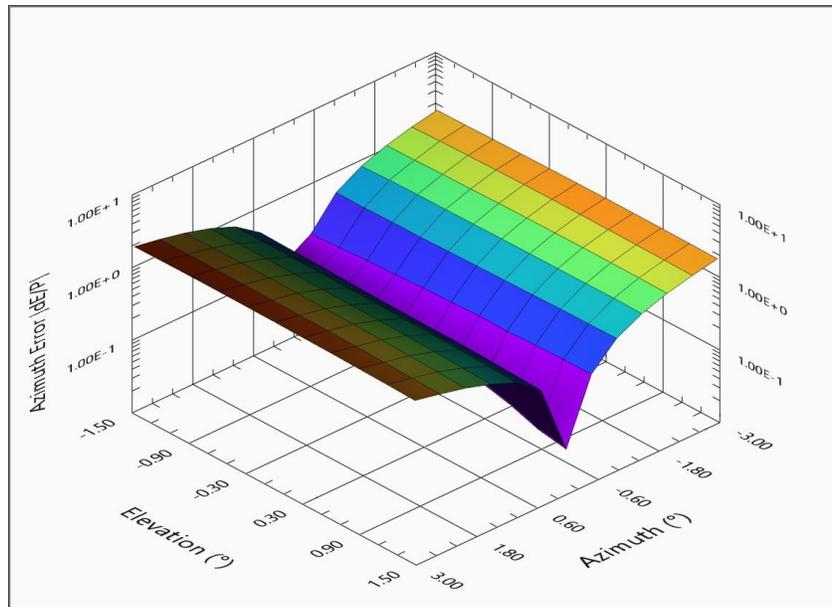


Figura 3.14. Mapa de error absoluto de azimut.

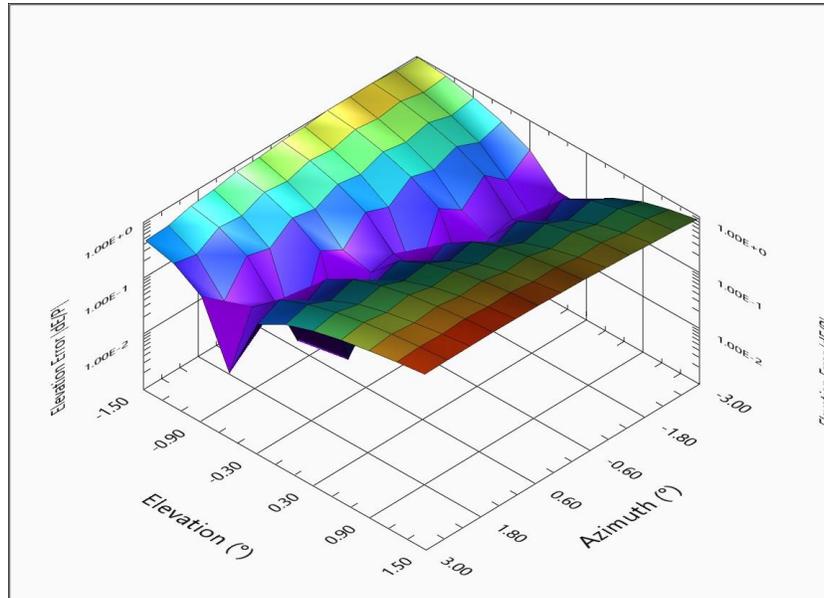


Figura 3.15. Mapa de error absoluto de elevación.

En los mapas presentados en las Figuras 3.16 y 3.17 se muestran nuevamente los errores de azimut y elevación para cada punto del *grid* del barrido bidimensional. La diferencia aquí es que se mantiene el signo del error, pudiendo ser negativo o positivo. Se evidencia una relación de

marcada linealidad, lo que facilitará la obtención de un coeficiente de error vs. variación angular, fundamental para la calibración de las curvas de seguimiento del sistema.

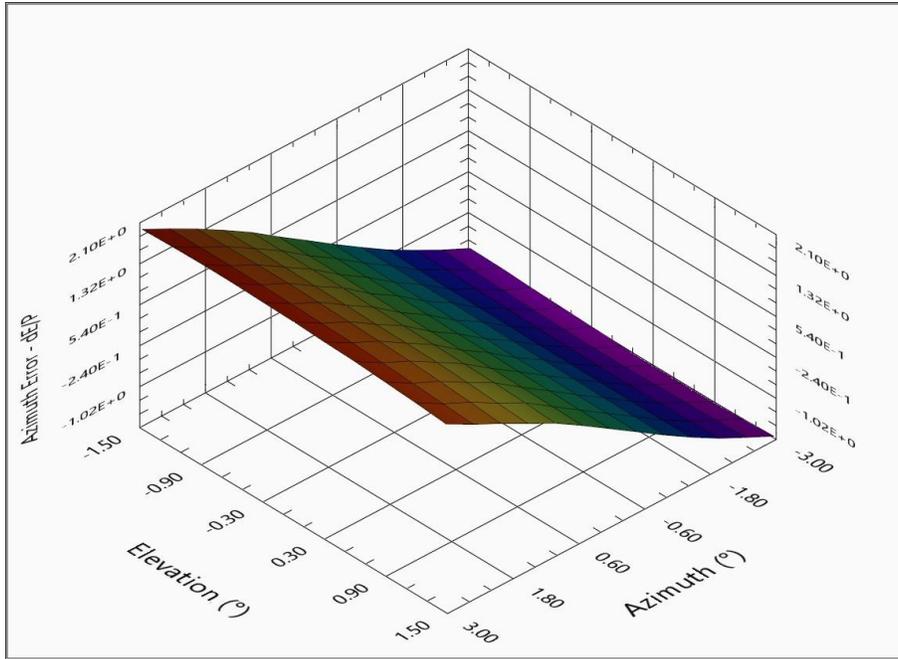


Figura 3.16. Mapa de error de azimut.

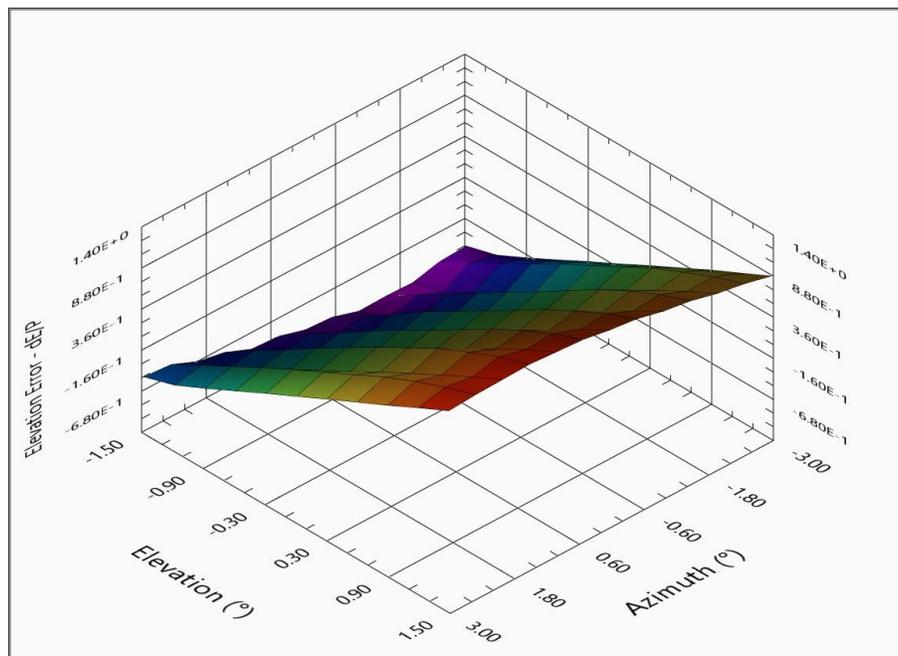


Figura 3.17. Mapa de error de elevación.

En la Figura 3.18 se presenta el mapa de error compuesto, combinación vectorial de los errores de azimut y elevación. Se puede observar que el punto más bajo de esta medición se encuentra en el centro del mapa, lo que demuestra que el punto central del barrido corresponde bien al mínimo de error global del sistema. Nótese que el error mínimo es único a diferencia de los mapas de azimut y elevación, cuyos mínimos se distribuyen en el plano.

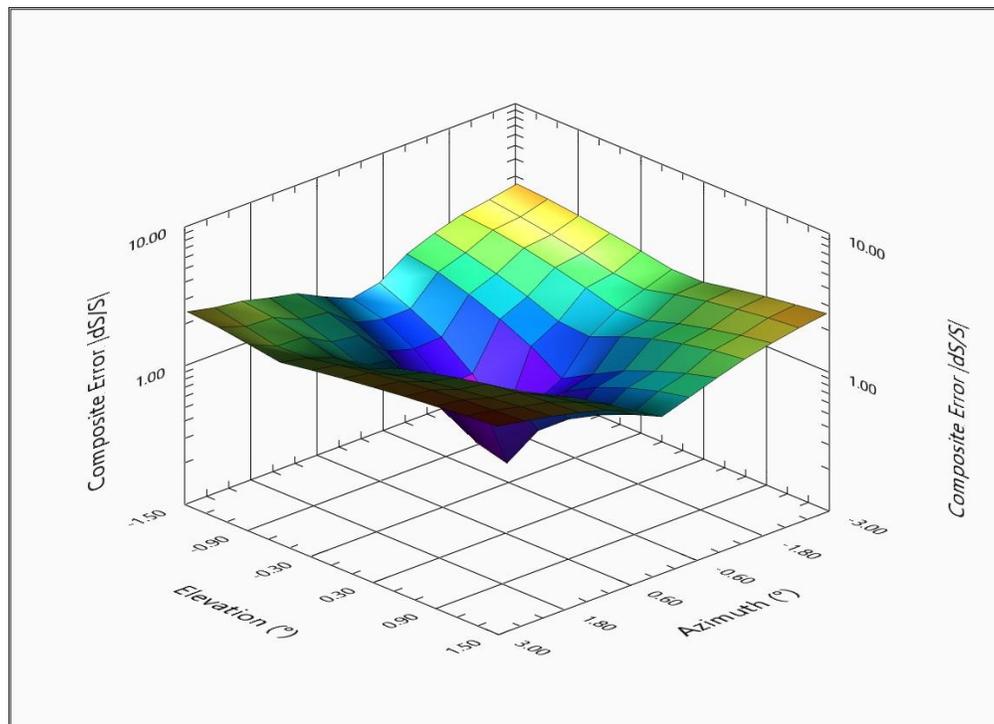
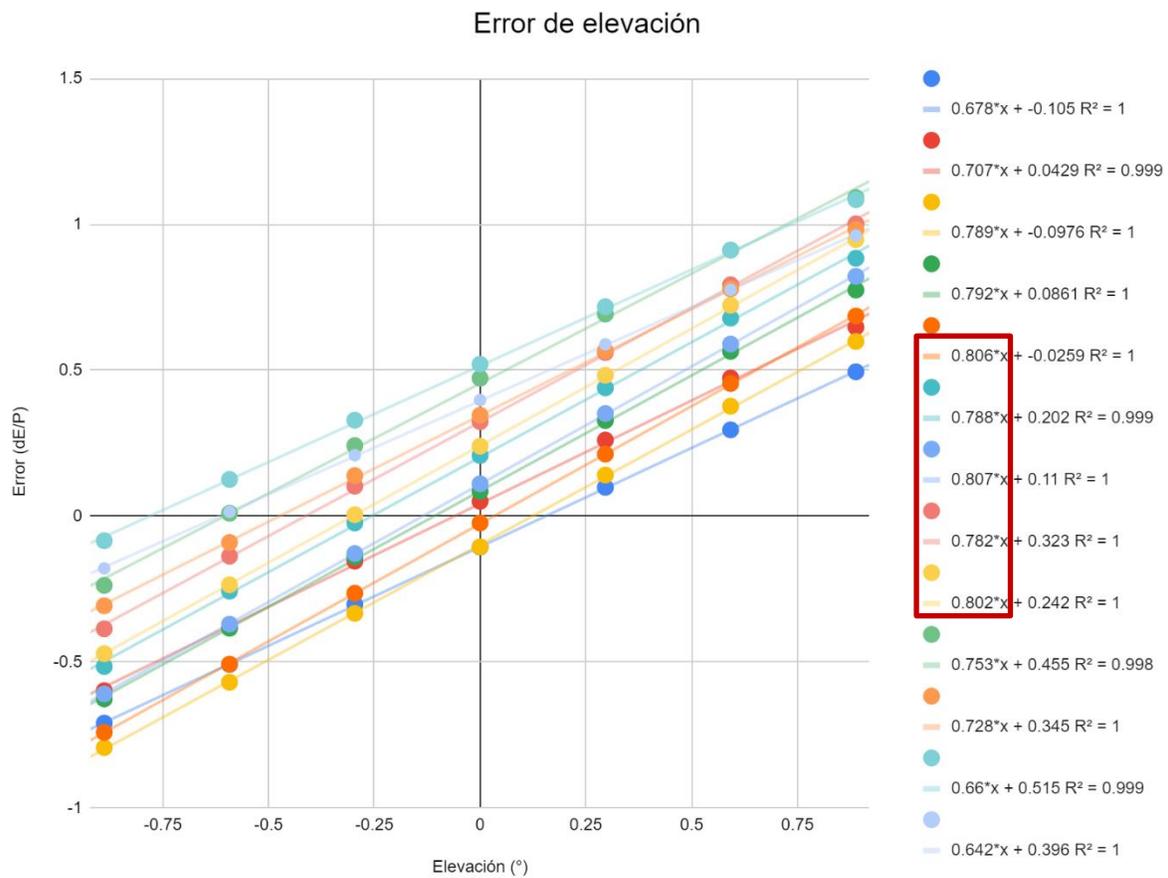
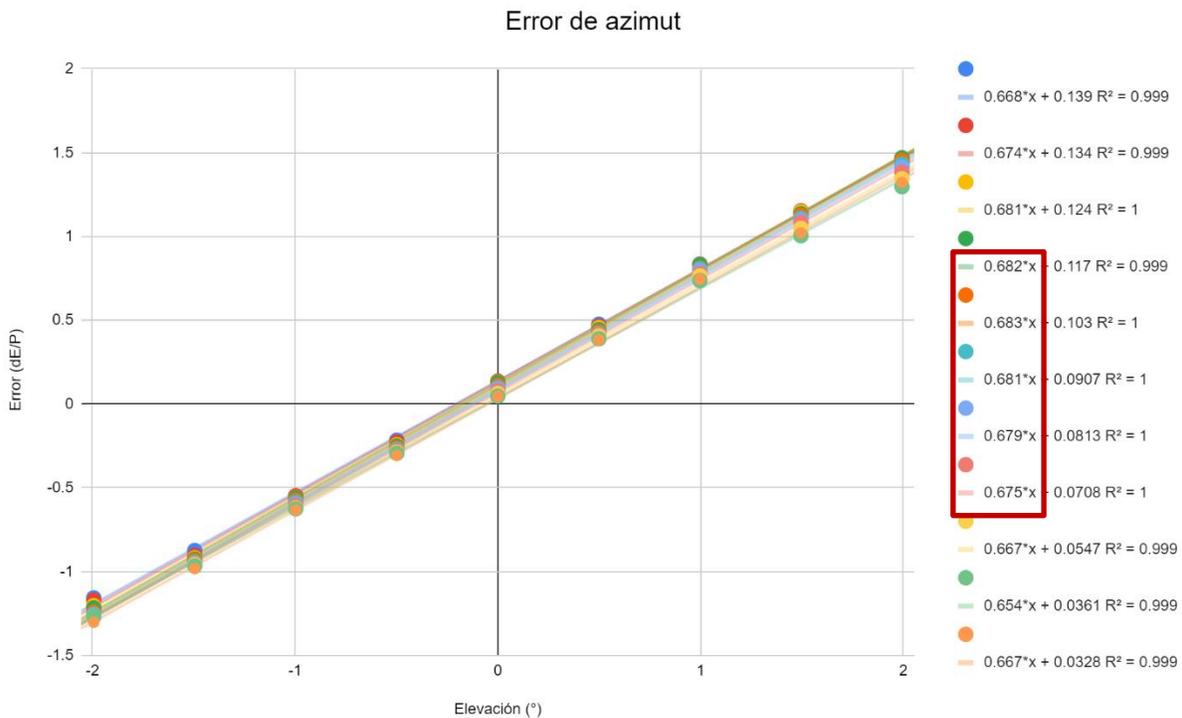


Figura 3.18. Mapa de error compuesto.

Por otro lado, la determinación de los coeficientes de error para los ejes azimut y de elevación se basó en el análisis de las gráficas generadas a partir de los datos de los mapas de error (Figuras 3.16 y 3.17), permitiendo extraer las líneas de tendencia por ajuste de *fit* lineal (Gráficas 3.2 y 3.3).



Gráfica 3.2. Línea de tendencia de error de elevación y obtención de coeficientes y R².



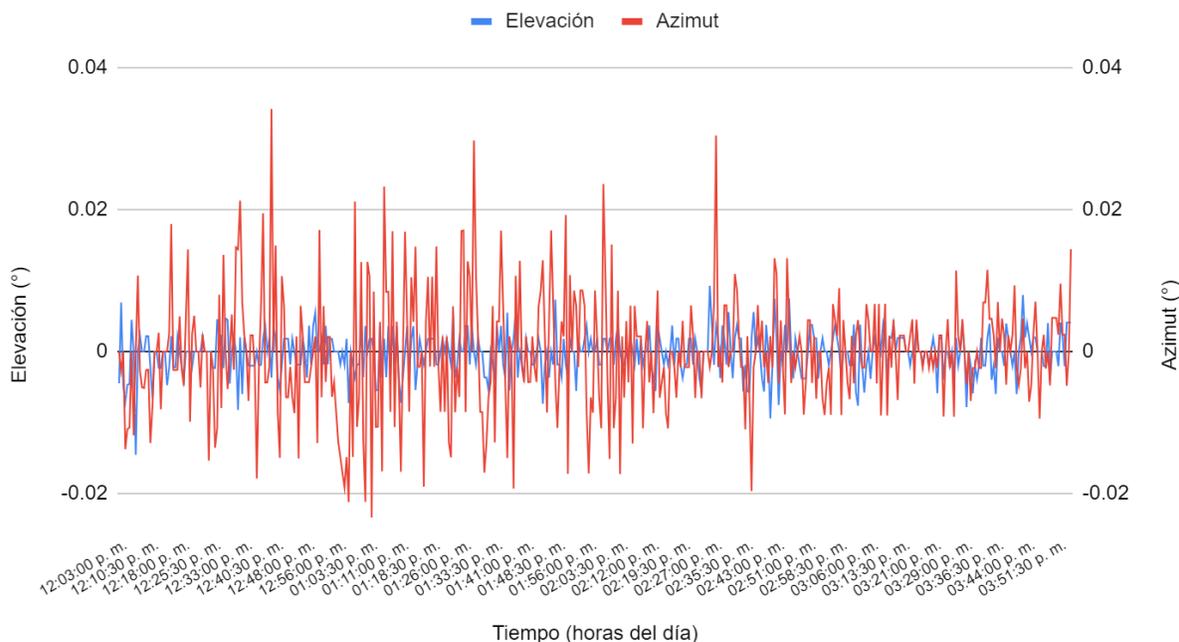
Gráfica 3.3. Línea de tendencia de error de azimut y obtención de coeficientes y R².

Al observar las Gráficas 3.2 y 3.3, se aprecia que los valores de R² se encuentran todos próximos a 1. Este indicador señala que el modelo de regresión tiene la capacidad de explicar la totalidad de la variabilidad en los datos y se ajusta de manera óptima a estos.

Asimismo, las pendientes de las líneas de tendencia de los datos recopilados (primer valor de la ecuación mostrada en las Gráficas 3.2 y 3.3) constituyen los coeficientes de interés para calibrar el error de seguimiento adimensional. Los valores más cercanos al centro de los mapas la línea de tendencia (valores dentro del recuadro) se consideraron para calcular el promedio de cada uno, tanto para azimut como para elevación, obteniendo 0.68 (dE/promedio)/grado y 0.79 (dE/promedio)/grado, respectivamente.

Estos promedios se utilizaron para ajustar los errores obtenidos durante el monitoreo en la plataforma web, convirtiéndolos en grados mediante la aplicación del coeficiente (ver Ecuación 10) a los valores de error normalizado como se muestra en la Gráfica 3.4.

Errores obtenidos a partir del monitoreo (8 de septiembre de 2023)



Gráfica 3.4. Errores de elevación y azimut (medido en grados).

Con los datos de esta misma gráfica se realizaron análisis estadísticos para comprender las pequeñas fluctuaciones alrededor de un nivel cercano a cero, ya que un aspecto crucial del sistema es el error residual, obtenido a partir de estas fluctuaciones. Dado que estos datos se generaron mediante el ajuste del *delay*, se realizaron evaluaciones del error compuesto y su desviación estándar para cada conjunto de datos. En primer lugar, se calculó el error compuesto de cada valor de cada conjunto de datos, previamente calibrado con el coeficiente, utilizando la Ecuación 11. Luego, se determinó la media y la desviación estándar de estos errores compuestos, tal como se presenta en la siguiente tabla:

$$Error\ compuesto = \sqrt{ErrorEL^2 + ErrorAZ^2} \tag{11}$$

Tabla 3.5. Resultados del error.

Prueba	Periodo (horas del día)	Delay (microsegundos)	Promedio de error compuesto (°)	Desviación estándar (°)
1	12:00:00 - 14:06:30	7,000	0.0086	0.0059
2	14:07:00 - 14:40:30	10,000	0.0055	0.0048
3	14:46:00 - 15:06:30	12,000	0.0050	0.0026

Después de analizar detalladamente la Gráfica 3.4 y la Tabla 3.5, se llega a varias conclusiones fundamentales. Estas mediciones respaldan la capacidad del sistema para mantener un margen de error limitado, ratificando la selección adecuada del valor de *delay* durante las pruebas, como se ha discutido anteriormente.

Asimismo, en la tabla, se nota una menor desviación estándar en la prueba 3 en comparación con las anteriores. Esta observación subraya aún más la capacidad del sistema de control para mantener un margen de error limitado a $0.005^\circ \pm 0.0026^\circ$, demostrando así su alto nivel de precisión y fiabilidad.

En línea con este hallazgo, se destaca la importancia crucial de mantener un bajo nivel de error en el sistema de control ya que esta precisión asegura una eficiencia máxima al mantener el seguidor alineado de manera precisa con la posición del sol. Esto se traduce directamente en una mayor producción de energía eléctrica o térmica, lo que es esencial para maximizar el rendimiento del sistema y garantiza que la conversión de la radiación solar en energía utilizable sea eficiente ya que como mencionan Stanek *et al.* (2022), la dimensión del error puede provocar una disminución significativa en la eficiencia, lo que destaca la importancia de la precisión en el seguimiento solar. En su investigación se evidenció que un error máximo de ángulo de seguimiento de 1.5° puede no afectar significativamente el rendimiento del absorbedor, pero un error de 2° puede reducir la eficiencia en un 4.7% y 42.5% para diferentes diámetros de los colectores solares lineales en colectores cilindro parabólicos. Estos descubrimientos refuerzan la necesidad de mantener un enfoque riguroso en la precisión del sistema de seguimiento solar, para garantizar un rendimiento óptimo y eficiente en la generación de energía solar a largo plazo. La información recopilada de estos análisis cuantitativos y visuales corrobora la efectividad y la capacidad del sistema para detectar y corregir errores de manera confiable y precisa [34].

Otra forma de comprobar la precisión del sistema es realizando un histograma bidimensional tal como aparece en la Figura 3.19 y en la Gráfica 3.5.

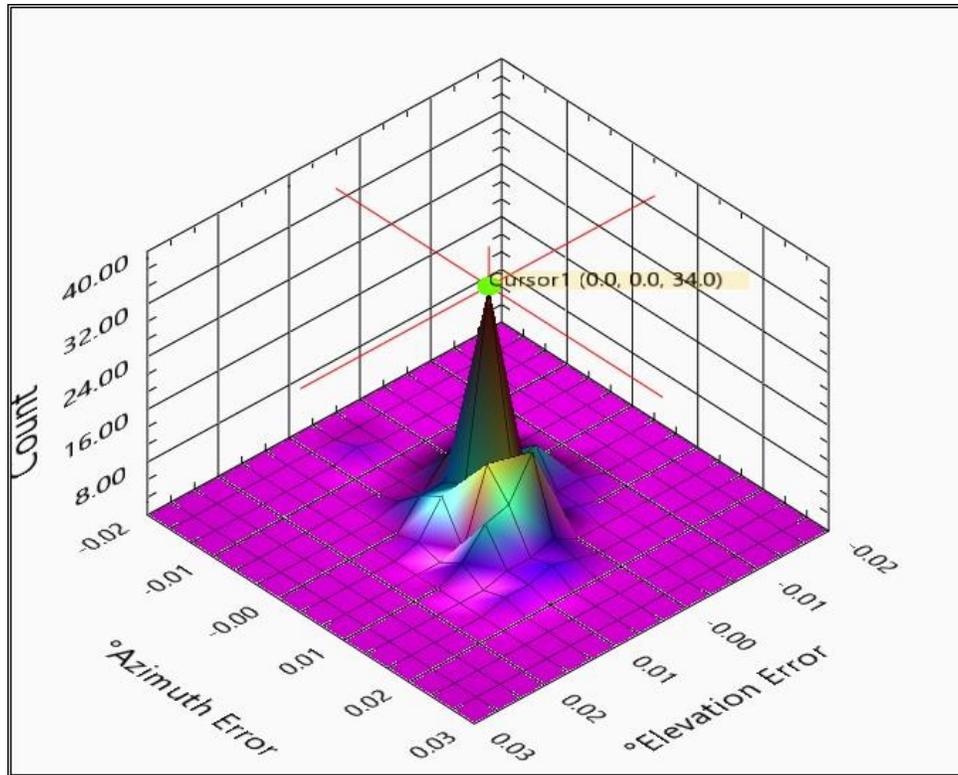
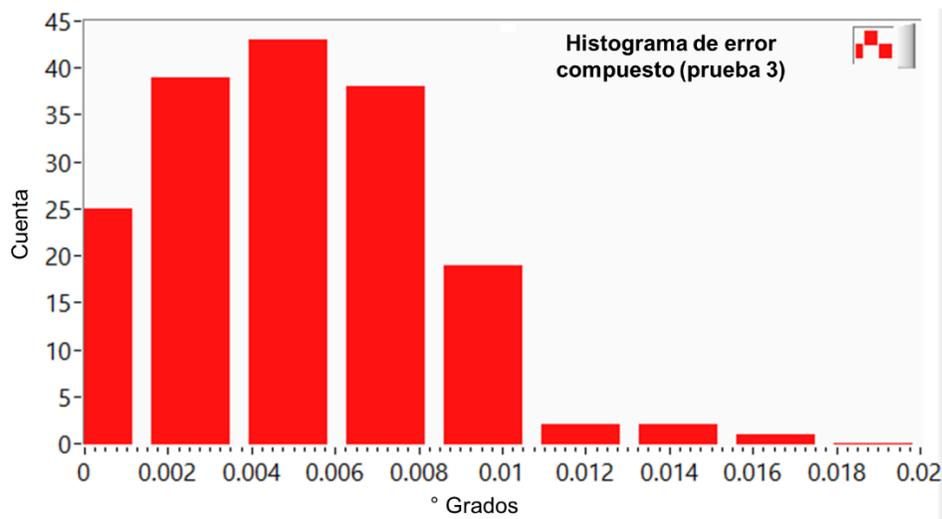


Figura 3.19. Histograma de errores obtenidos en la prueba 3 en 3D.



Gráfica 3.5. Histograma de errores obtenidos en la prueba 3.

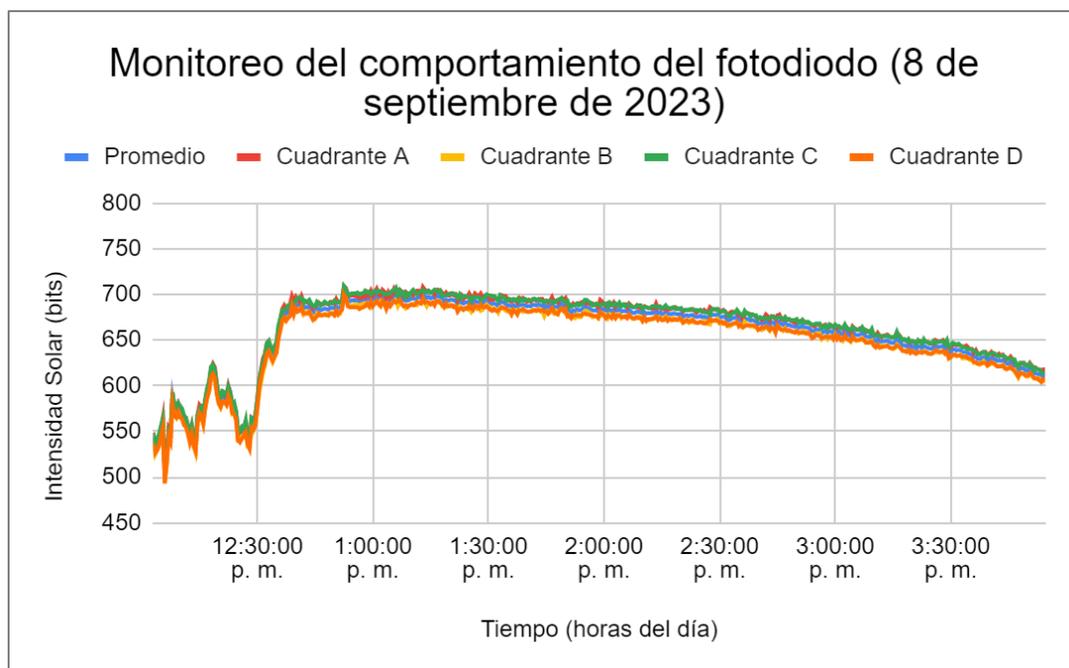
En la Figura 3.19 se puede apreciar el histograma de la Gráfica 3.5 en 3D donde el punto más alto representa la cantidad de veces que el sistema de control del seguidor tuvo un error de 0°. Estos gráficos representan el resultado del monitoreo realizado durante el periodo de la prueba 3, en el cual el valor del *delay* se ajustó para minimizar el ruido. El histograma ilustra claramente

cómo la mayoría de los datos se agrupan en torno al valor cero, lo que confirma la precisión y estabilidad del sistema.

3.5. Monitoreo del seguidor solar

En esta sección se presentan los resultados derivados del monitoreo detallado del sistema CPVT. Se llevaron a cabo pruebas específicas siguiendo la metodología mencionada en el capítulo anterior con las cuales se recopilaron datos relacionados con diversos aspectos del sistema, como los cuadrantes del fotodiodo (A, B, C y D), el promedio de los cuadrantes y los errores, cuyos resultados se presentan en el apartado anterior. Durante un período de aproximadamente 4 horas, el prototipo operó en modo automático los días 8 y 12 de septiembre de 2023 en el Parque Científico Tecnológico de Yucatán, con coordenadas geográficas de 21.1314688 de latitud y -89.7830377 de longitud. Los datos se transmitieron a través del módulo ESP32-WROOM-32 a la plataforma correspondiente.

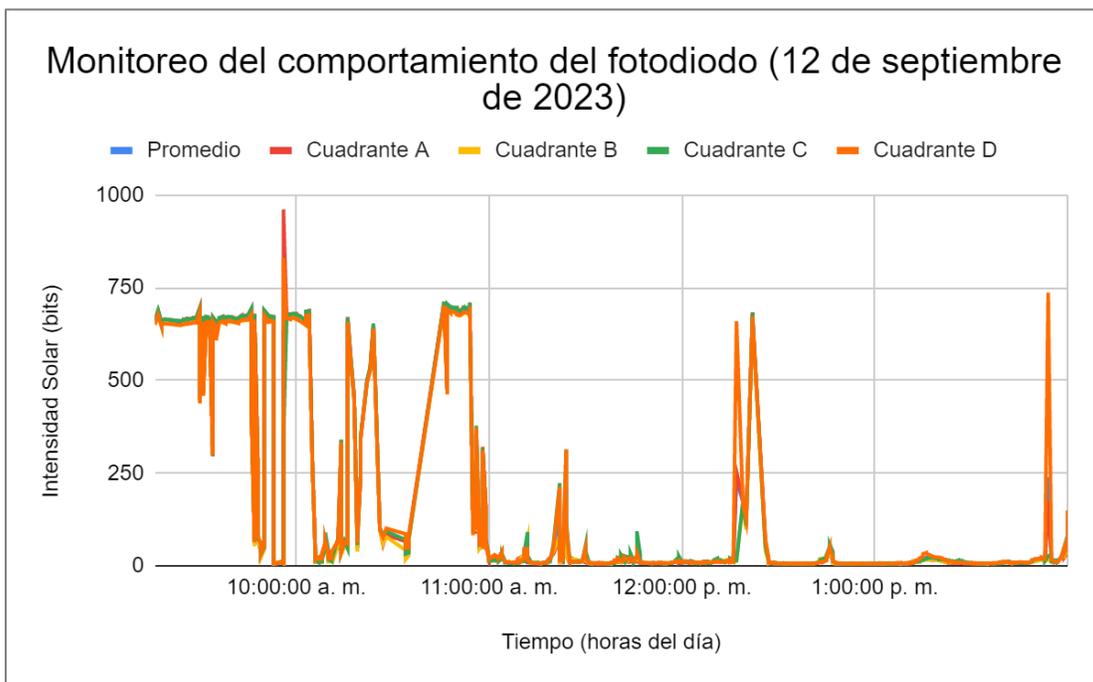
Una vez obtenidos los datos y seleccionados los correspondientes a las pruebas realizadas, se procedió a graficarlos. La representación del monitoreo de los cuadrantes del fotodiodo, realizado el día 8 de septiembre en el horario de 12:00 a 16:00 GMT-6, se puede observar en la Gráfica 3.6.



Gráfica 3.6. Monitoreo del fotodiodo el 8 de septiembre de 2023

En esta gráfica se presenta el comportamiento del fotodiodo durante el seguimiento realizado en el horario mencionado anteriormente, aquí se puede observar que durante los primeros 30 minutos del seguimiento los valores oscilaron entre 493 y 593 bits, indicando la presencia de nubes. Sin embargo, durante el resto del periodo, los valores se mantuvieron entre 609 y 709 bits, sugiriendo condiciones despejadas. Es importante destacar que los cuatro cuadrantes mostraron un comportamiento similar a lo largo de la prueba, lo que señala una distribución equitativa de la luz solar en cada uno. Esto es un indicativo de que el fotodiodo está bien alineado y que no hay desviaciones significativas en su posición que puedan llevar a una distribución desigual de la luz entre los cuadrantes, lo que garantiza una detección precisa de la posición del sol.

La Gráfica 3.7 muestra los resultados del monitoreo realizado el 12 de septiembre entre las 9:16 y las 14:00 GMT-6.



Gráfica 3.7. Monitoreo del fotodiodo el 12 de septiembre de 2023.

En esta gráfica se puede observar que, a diferencia de la prueba anterior, se registraron valores iniciales en torno a los 670 bits. Sin embargo, a lo largo de la prueba, se observa la presencia persistente de nubosidad, lo que indica que el sistema se detuvo en varios momentos. A pesar de las interrupciones, el fotodiodo logró reajustarse con éxito cada vez que la nube se despejaba, volviendo a encontrar el punto óptimo donde todos los cuadrantes reciben una cantidad similar

de luz solar. Y al igual que en la prueba anterior, los cuatro cuadrantes mostraron un comportamiento conjunto durante la mayor parte del período de la prueba, con algunas excepciones donde el cuadrante D presentó valores más altos. Esto se atribuye a la transmisión de datos durante el proceso de reajuste del sistema después del paso de una nube.

Finalmente, gracias al monitoreo realizado, se determinó que el seguidor solar tiene un período de funcionamiento de 8 horas, que comprende desde las 8:00 hasta las 16:00 GMT-6.

CONCLUSIONES

El sistema de seguimiento solar se probó con éxito, verificando su ajuste continuo conforme al movimiento del sol. Además, se probó también su capacidad para detenerse y reanudar el seguimiento solar en respuesta a las coberturas nubosa transitorias, garantizando un uso eficiente de la energía y un rendimiento óptimo en diversas condiciones climáticas.

La implementación del circuito amplificador de transimpedancia para el seguimiento solar ha sido validada mediante pruebas exhaustivas, ajustes precisos y una amplificación estable de la señal del fotodiodo, asegurando un rendimiento óptimo bajo diferentes niveles de radiación solar variable y optimizando el rango dinámico en concordancia con las entradas analógicas del ADC del microcontrolador.

En lo que toca al algoritmo de control *on-off* con banda muerta, los resultados óptimos se obtuvieron al ajustar el valor de *delay* a 12 mil microsegundos y la banda muerta a un rango de 0-0.002 minimizando la desviación estándar del error de seguimiento.

La disposición inversa de los valores máximos y mínimos (Ay C, D y B respectivamente) de la radiación solar sobre el fotodiodo revela un rango dinámico equilibrado, con valores que oscilan cercanos a 1024 bits y próximos a cero. Asimismo, los cuatro cuadrantes han exhibido una distribución equitativa de la luz solar durante el proceso de monitoreo, lo que indica un alineamiento adecuado del fotodiodo y una detección precisa de la posición solar.

La desviación estándar combinada de los cuadrantes exhibe un mínimo en el centro, destacando una alineación precisa del fotodiodo con los rayos solares y una detección altamente precisa en esa ubicación específica.

El sistema control del seguidor solar demuestra un alto nivel de precisión, con un margen de error notablemente bajo de tan solo $0.005^\circ \pm 0.0026^\circ$. Esto destaca la robustez y la fiabilidad del sistema para realizar el seguimiento. La capacidad del sistema para mantener un error tan mínimo subraya su idoneidad para aplicaciones que requieren mediciones altamente precisas y confiables ya que al tener un error del sistema de control tan bajo se asegura una eficiencia energética máxima al mantener el seguidor alineado de manera precisa con la posición del sol.

El diseño compacto que integra sensor, amplificador, ADC y microcontrolador en el mismo gabinete y en un volumen pequeño, minimizando longitudes de conductores analógicos, es una de las claves de la baja dispersión del error de seguimiento.

Adicionalmente, la adopción de un diseño que incorpora un domo con un orificio estratégico sobre el fotodiodo demostró ser efectiva al evitar la saturación del sensor y garantizar una correcta incidencia de los rayos solares. Los resultados obtenidos, con un error del sistema de control de tan solo $0.005^\circ \pm 0.0026^\circ$, respaldan la eficacia y precisión de esta configuración. Esto refuerza la validez de la estrategia empleada para minimizar interferencias, subrayando el éxito de la implementación en la optimización del rendimiento del sistema de seguimiento solar. Sin embargo, no se debe descartar la posibilidad futura de utilizar algún filtro pasabanda infrarrojo para mejorar aún más la capacidad de seguimiento en condiciones nubosas.

La adopción de motores a pasos en el diseño del sistema de seguimiento solar ha demostrado beneficios significativos en términos de precisión y control, a pesar de la naturaleza discreta de los pasos, y ventajas económicas.

El seguidor solar ha demostrado un período de funcionamiento efectivo de 8 horas, comprendiendo desde las 8:00 hasta las 16:00 GMT-6.

PERSPECTIVAS

Este prototipo tiene un gran potencial para aplicaciones a corto plazo tales como, su aprovechamiento para ser un banco de pruebas para celdas fotovoltaicas de capa fina, ya que puede ser aprovechado para caracterizarlas y en aplicaciones que requieran de una alta temperatura, concentración solar o el uso de agua caliente.

Dentro de estas aplicaciones destacan las siguientes que tienen que ver con investigaciones de la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán.

- El sensor se podría mejorar con un filtro pasabanda infrarrojo, que ha demostrado buena inmunidad a la presencia de nubes. Se contempla una evolución hacia la automatización y control remoto. La implementación actual, que ya incorpora la tarjeta ESP32-WROOM-32 para la adquisición de datos mediante conexión *Wi-Fi*, sienta las bases para un avance hacia un control integral y remoto del sistema, que incluya ajuste de parámetros y control manual de manera inalámbrica y remota.

El objetivo es optimizar la eficiencia y comodidad del sistema, brindando a los usuarios la capacidad de realizar ajustes y correcciones desde cualquier ubicación con acceso a la plataforma en línea. Este enfoque no solo simplificará la gestión del sistema, sino que también abrirá nuevas posibilidades para su integración con tecnologías emergentes y la participación en redes inteligentes de energía. La conectividad remota aprovechará al máximo las funcionalidades del módulo ESP32-WROOM-32, transformando el sistema de seguimiento solar en una solución más flexible, adaptativa y fácil de gestionar en entornos cambiantes.

- El código tiene la posibilidad de recuperar el conteo de pulsos de los motores a pasos (a la manera de un *encoder* digital) y de ahí derivar la posición angular absoluta del sistema, lo que lo convertiría en un sensor absoluto de posición solar.
- Otra mejora radica en el uso de otro tipo de controladores, como los PID's, que podrían reducir más la dispersión del error de seguimiento.

- El uso del agua residual del sistema de enfriamiento se podría utilizar para el proceso de lavado de sargazo en agua dulce ya que este es un paso de pretratamiento que se usa a menudo en una amplia variedad de estudios de investigación de biocombustibles de algas, debido a que se utiliza para eliminar impurezas inertes, como grava, arena y sales, limitando de esta manera su acumulación en los reactores.

Además, se ha encontrado que las algas producen un 34% más de metano cuando se lava y se seca a temperatura ambiente en comparación a las que no se lavan; y se encontró también que estas tienen un aumento de metano del 42% para la especie *G. vermiculophylla* cuando esta es lavada y macerada en comparación a la que no [42].

- Se plantea la posibilidad de utilizar el prototipo para brindar una alternativa de métodos de calor concentrado, en el campo del procesamiento de cultivos microalgales, como el horno de microondas y las técnicas asistidas por microondas para la extracción de lípidos, reduciendo de esta manera la dependencia de fuentes de energía convencionales y no renovables.

Con la investigación continua y el desarrollo de métodos de extracción de lípidos cada vez más eficientes, se vislumbra un futuro prometedor en el campo de la energía renovable, donde las microalgas y los métodos de extracción de calor desempeñarán un papel vital en la promoción de una industria más limpia y respetuosa con el medio ambiente. Este enfoque multidisciplinario hacia la extracción de lípidos de microalgas no solo ofrece ventajas técnicas y económicas, sino que también promueve un impacto positivo en el medio ambiente y la sociedad en general.

BIBLIOGRAFÍA

1. El Himer, S., El Ayane, S., El Yahyaoui, S., Salvestrini, J. P., & Ahaitouf, A. (2020). Photovoltaic Concentration: Research and Development. *Energies*, 13(21), 5721. doi:<https://doi.org/10.3390/en13215721>
2. Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754-782. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>
3. Angulo Calderón, M. (2018). Desarrollo de un sistema fotovoltaico de concentración para aplicaciones de co-generación. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
4. Hasan, H. A., Sopian, K., & Fudholi, A. (2018). Photovoltaic thermal solar water collector designed with a jet collision system. *Energy*, 161, 412-424. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.141>
5. Algora, C., & Rey-Stolle, I. (2016). *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*. Wiley.
6. Renno, C. (2022). Energy and economic comparison of three optical systems adopted in a point-focus CPV system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 4(99). doi:<https://doi.org/10.1007/s40430-022-03408-y>
7. Mateos Canseco, A. (2018). Modelo acoplado óptico-térmico, basado en análisis de trazado de rayos y el método de los cuadrupolos térmicos, para el análisis y diseño de sistemas de concentración solar fotovoltaica. Mérida, Yucatán.
8. International Electrotechnical Commission. (2016). IEC 62108. Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies – Design qualification. .
9. Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. (2015). Obtenido de Canal Parabólico y Fresnel: <http://www.concentrationsolar.org.mx/concentracion-solar/canal-parabolico-y-fresnel>
10. Iglesias, M., & Bello Bugallo, P. (2011). Hacia el autoabastecimiento energético Microgeneración distribuida de energías térmica y eléctrica.
11. Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2015). Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I – Fundamentals, design considerations and current technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1500-1565.
12. Davis, A., & Kühnlenz, F. (2011). Optical Design using Fresnel Lenses. *Optik & Photonik*, 2, 52-55. doi:<https://doi.org/10.1002/opph.201190287>

13. Madhugiri, G., & Karale, S. (2012). High solar energy concentration with a Fresnel lens: A Review. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2, 1381-1385.
14. Asitimbay Regalado, M. (2018). Método de detección de puntos calientes en paneles solares.
15. Hossam, B., & Itako, K. (2016). Real time hotspot detection using scan-method adopted with P&O MPPT for PV generation system. 016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC).
16. Sierra, C., & Vazquez, A. J. (2005). High solar energy concentration with a Fresnel lens. *Journal of Materials Science*, 1339–1343.
17. Ye, Z., Li, Q., Zhu, Q., & Pan, W. (2009). The cooling technology of solar cells under concentrated system. 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, (págs. 2193-2197).
18. Jakhar, S., Soni, M. K., & Gakkhar, N. (2016). Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41-59.
19. Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2015). Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I – Fundamentals, design considerations and current technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1500-1565.
20. Mittelman, G., Kribus, A., & Dayan, A. (2007). Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Energy Conversion & Management*, 2481–2490.
21. Chenlo, F., & Cid, M. (1987). A linear concentrator photovoltaic module: analysis of non-uniform illumination and temperature effects on efficiency. *Solar Cells*, 27-39.
22. Sonneveld, P. J., Swinkels, G., van Tuijl, B., Janssen, H., Campen, J., & Bot, G. (2011). Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses. *Solar Energy*, 432-442.
23. Xu, N., Ji, J., Sun, W., & Han, L. (2015). Outdoor performance analysis of a 1090× point-focus Fresnel high concentrator photovoltaic/thermal system with triple-junction solar cells. *Energy Conversion and Management*, 100, 191-200.
24. Tarazona-Romero, B. E., Carreño-Rodríguez, J. S., Quintero-Ruiz, A. D., Sandoval-Rodríguez, C. L., & Lenguerke-Pérez, O. (2022). Evaluation of solar tracking systems applied to small-scale photovoltaic systems: a review. *IOP Conference Series*:

- Materials Science and Engineering, 1253(1), 1-12. doi:DOI 10.1088/1757-899X/1253/1/012002
25. Sallaberry, F., Pujol-Nadal, R., Larcher, M., & Rittmann-Frank, M. H. (2015). Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. *Energy Conversion and Management*, 105, 1281-1290. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.081>
 26. De La Gala Contreras, A. (2018). Implementación de un Seguidor Solar para la Evaluación Energética Comparativa de Paneles Fotovoltaicos. Tacna, Perú.
 27. González Mendoza, J. M. (2012). Diseño de los mecanismos para un seguidor solar pseudo-ecuatorial. Ciudad de México.
 28. Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1800-1818. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>
 29. Díaz Ponce, A., Garrido, R., & Soto-Bernal, J. (2018). A Filtered Sun Sensor for Solar Tracking in HCPV and CSP Systems. *IEEE Sensors Journal*, 19(3), 917-925. doi:DOI:10.1109/JSEN.2018.2879460
 30. Hoffmann, F. M., Molz, R. F., Kothe, J. V., Benitez Nara, E. O., & Carvalho Tedesco, L. P. (2018). Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable Energy*, 115, 750-759. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.079>
 31. De La Cruz Casaño, C., León Aduato, C., Mandujano Espinal, J., Cáceres Ravichagua, R., & Rojas Malpartida, I. (2012). Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2(2), 89-100. doi:<https://doi.org/10.18259/acs.2012011>
 32. Kaur, T., Mahajan, S., Verma, S., Priyanka, & Gambhir, J. (2016). Arduino based low cost active dual axis solar tracker. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), (págs. 1-5). Delhi, India. doi:doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853398
 33. Yao, Y., Hu, Y., Gao, S., Yang, G., & Du, J. (2014). A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. *Renewable Energy*, 72, 88-98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.002>
 34. Stanek, B., Węcel, D., Bartela, Ł., & Rulik, S. (2022). Solar tracker error impact on linear absorbers efficiency in parabolic trough collector – Optical and thermodynamic

- study. *Renewable Energy*, 196, 598-609. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.021>
35. Fuentes Morales, R. F., Díaz Ponce, A., Peña Cruz, M. I., Rodrigo, P. M., Valentín Coronado, L. M., Martell Chavez, F., & Pineda Arellano, C. A. (2020). Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review. *Solar Energy*, 212, 203-219. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.071>
 36. Morón, C., Fernández, D., Sainz, P., Vega, G., & Díaz, J. P. (2017). New Prototype of Photovoltaic Solar Tracker Based on Arduino. *Energies*, 10(9), 1298. doi:<https://doi.org/10.3390/en10091298>
 37. Hammoumi, A. E., Motahir, S., Ghzizal, A. E., Chalh, A., & Derouich, A. (2018). A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. *Energy Science & Engineering*, 6(5), 607-620. doi:<https://doi.org/10.1002/ese3.236>
 38. Jamroen, C., Komkum, P., Kohsri, S., Himananto, W., Panupintu, S., & Unkat, S. (2020). A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100618>
 39. Marín Cano, E., & Quintero Moreno, D. (2017). Metodología para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica y eficiencia energética en el sector rural del eje cafetero. Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira.
 40. Fontal , B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi , F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. Mérida, Venezuela.
 41. Pacific Silicon Sensor Incorporated. (2010). Pacific Silicon Sensor Quadrant Series Data Sheet. Part Description QP50-6-18u-TO8. Obtenido de https://www.mouser.mx/datasheet/2/313/fsens00050_1-2279854.pdf
 42. Maneein, S., Milledge, J. J., Nielsen, B. V., & Harvey, P. J. (2018). A Review of Seaweed Pre-Treatment Methods for Enhanced Biofuel Production by Anaerobic Digestion or Fermentation. *Fermentation*, 4(100). doi:<https://doi.org/10.3390/fermentation4040100>
 43. Lee, J.-Y., Yoo, C., Jun, S.-Y., Ahn, C.-Y., & Oh, H.-M. (2010). Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresource Technology*, 101(1), S75-S77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.058>
 44. Šoštarič, M., Klinar, D., Bricelj, M., Golob, J., Berovič, M., & Likozar, B. (2012). Growth, lipid extraction and thermal degradation of the microalga *Chlorella vulgaris*. *New Biotechnology*, 29(3), 325-331. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.12.002>

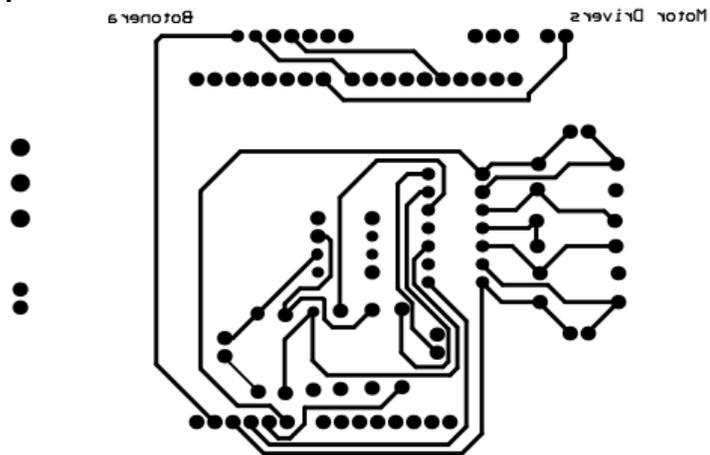
45. Mubarak, M., Shaija, A., & Suchithra, T. V. (2015). A review on the extraction of lipid from microalgae for biodiesel production. *Algal Research*, 7, 117-123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.10.008>

ANEXOS

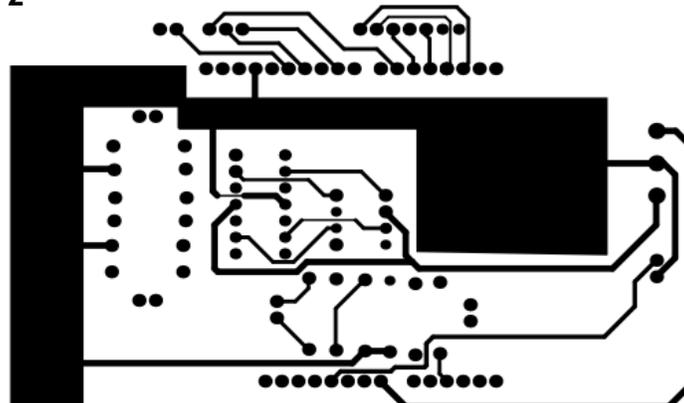
ANEXO I. Diseño de circuito impreso (PCB)

Este diseño de circuito impreso (PCB) es una placa de dos caras que se monta sobre el Arduino UNO, a manera de tarjeta *shield*. En esta placa se conectan los drivers, los botones de control manual, los interruptores de límite, y también se incluye un plano de tierra para minimizar el ruido electromagnético. Además, sirve como punto central para la distribución de la alimentación eléctrica, conectando tanto el suministro del Arduino como el del amplificador.

CARA 1



CARA 2



ANEXO II. Código de funcionamiento general del sistema de seguimiento

Este código corresponde al control manual y automático del seguidor solar de dos ejes con funciones de concentración. Utiliza las lecturas de un fotodiodo de cuatro cuadrantes para para ajustar automáticamente la posición y maximizar la captación de energía solar. También incluye la capacidad de control manual a través de botones. Los motores se detienen en los límites predefinidos o mediante la entrada de botones. La información clave, como los valores de los sensores, su promedio y errores, se imprime en el monitor serial y se transmiten a través de la tarjeta ESP32-WROOM-32 a la plataforma web vía *Wi-Fi* para el seguimiento y la monitorización.

```
//Asignación de entradas y valores iniciales (Analógico)
int signalA = A3;
int signalB = A2;
int signalC = A1;
int signalD = A0;
int sensorPin = A4;
int outA = 0;
int outB = 0;
int outC = 0;
int outD = 0;
int sensorValue = 0;

//Asignación de pines digitales para relojes
int CLKe = 7;
int CLKa = 6;

//Asignación de pines digitales y valores iniciales de los botones
int redbutton = 2;
int greenbutton = 3;
int Br = 0;
int Bg = 0;

//Digital output assignment for direction and enable pins
float dirEL = 12;
float dirAZ = 11;
float enEL = 10;
float enAZ = 9;

//Asignación de salida digital para pines de dirección y habilitación
```

```

char rot = 'n';

//Botones de límites de eje
int limitE2 = 13;
int limitA2 = 8;
int limitE1 = 5;
int limitA1 = 4;
int LA1 = 0;
int LA2 = 0;
int LE1 = 0;
int LE2 = 0;

long encoder_Az = 0.0;
long encoder_El = 0.0;

float prom = 0.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
float dl2 = 0.0; //Cálculos de dirección para el ángulo azimutal
float dl1 = 0.0; //Cálculos de dirección para el ángulo de elevación
float cld = 150.0; //Valor de la nube
float EP = 0.002; // Error máximo permitido
float offsetA = 27.0;
float offsetB = 28.0;
float offsetC = 25.0;
float offsetD = 26.0;
float CoefB = 1.00096;
float CoefC = 1.00085;
float CoefD = 1.0074;

unsigned long tiempoAnterior = 0;
unsigned long tiempoActual = 0;

bool valorImpreso = false; // Variable booleana para controlar si la variable se ha impreso

void setup() {
  pinMode(signalA, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante A
  pinMode(signalB, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante B
  pinMode(signalC, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante C
  pinMode(signalD, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante D
  pinMode(redbutton, INPUT); //Botón rojo para el control manual del azimut
  pinMode(greenbutton, INPUT); //Botón verde para el control manual de la elevación
  pinMode(dirEL, OUTPUT); // Dirección de elevación

```

```

pinMode(dirAZ, OUTPUT); // Dirección azimut
pinMode(enEL, OUTPUT); //Activar para elevación
pinMode(enAZ, OUTPUT); //Activar para azimut
pinMode(CLKe, OUTPUT); //Reloj de elevación
pinMode(CLKa, OUTPUT); //Reloj para azimut
pinMode(limitA1, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de azimut
pinMode(limitA2, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de azimut
pinMode(limitE1, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de elevación
pinMode(limitE2, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de elevación

Serial.begin (9600);
Serial.println ("LABEL, EL, AZ, AVERAGE, A, B, C, D, LA1, LA2, LE1, LE2");
}

void loop() {

LA1 = digitalRead(limitA1); //Lectura del valor digital del botón del límite de azimut 1
LA2 = digitalRead(limitA2); //Lectura del valor digital del botón del límite de azimut 2
LE1 = digitalRead(limitE1); //Lectura del valor digital del botón límite de elevación 1
LE2 = digitalRead(limitE2); //Lectura del valor digital del botón límite de elevación 2

if ((LA1 == LOW || LA2 == LOW) || (LE1 == LOW || LE2 == LOW)) { //Si los ángulos alcanzan el límite, los motores se
paran
    rot = 's'; //Cambiar el estado a parada general
}
else
{
    rot = 'n'; //El estado se mantiene en "n" si no se pulsan los microinterruptores de límite
}

Br = digitalRead(redbutton); //Lectura del valor digital del botón rojo
Bg = digitalRead(greenbutton); //Lectura del valor digital del botón verde

if (Br == LOW & Bg == HIGH) rot = 'a'; //Seleccionar caso en switch
if (Br == HIGH & Bg == LOW) rot = 'e'; //Seleccionar caso en switch
if (Br == LOW & Bg == LOW) rot = 's'; //Seleccionar caso en switch

tiempoActual = millis();

if (tiempoActual - tiempoAnterior >= 1000) {
    tiempoAnterior = tiempoActual;
}
}

```

```

if (!valorImpreso) {

    outA = (1023.0 - analogRead(signalA)) - offsetA;
    outB = ((1023.0 - analogRead(signalB)) - offsetB) * (CoefB);
    outC = ((1023.0 - analogRead(signalC)) - offsetC) * (CoefC);
    outD = ((1023.0 - analogRead(signalD)) - offsetD) * (CoefD);
    prom = (outA + outB + outC + outD) / 4.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo

    if (prom == 0.0) {
        prom = 0.1;
    }

    dl1 = (((outA + outB) - (outC + outD)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo de elevación
    dl2 = (((outA + outD) - (outB + outC)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo azimutal

    // *****

    Serial.print ("WIFI:");
    Serial.print ("dl1=" + String(dl1, 6) + "&dl2=" + String(dl2, 6) + "&prom=" + String(prom) + "&A=" + String(outA) +
"&B=" + String(outB) + "&C=" + String(outC) + "&D=" + String(outD) + "&LA1=" + String(LA1) + "&LA2=" + String(LA2)
+ "&LE1=" + String(LE1) + "&LE2=" + String(LE2) + "&Enc_EI=" + String(encoder_EI) + "&Enc_Az=" +
String(encoder_Az) + "&p=" + "0");
    Serial.println (":IFIW");

    // *****

}
}

else {

    valorImpreso = false;
}

switch (rot) {
case 'a': //Control manual del azimut
    digitalWrite(enAZ, LOW); //Habilitación del motor de azimut desactivada
    digitalWrite(CLKe, LOW); //El reloj de ángulo de elevación está desactivado para este estado
    sensorValue = analogRead(sensorPin);

    if ((sensorValue >= 512) && (LA1 == HIGH)) {
        digitalWrite(dirAZ, HIGH);
    }
}
}

```

```

digitalWrite(CLKa, HIGH);
delayMicroseconds(45);
digitalWrite(CLKa, LOW);
delayMicroseconds(45);
++encoder_Az;
}
else if ((sensorValue < 512) && (LA2 == HIGH)) { //Si el interruptor es igual o superior a 512, el motor se moverá
en el sentido de las manecillas del reloj
digitalWrite(dirAZ, LOW);
digitalWrite(CLKa, HIGH);
delayMicroseconds(45);
digitalWrite(CLKa, LOW);
delayMicroseconds(45);
--encoder_Az;
}

else {
digitalWrite(enAZ, LOW); //Off
}

rot = 'n';

break;

case 'e': //Control manual de elevación
digitalWrite(enEL, LOW); //Habilitación desde elevación motor desactivado
digitalWrite(CLKa, LOW); //El reloj de ángulo azimutal está desactivado para este estado
sensorValue = analogRead(sensorPin);

if ((sensorValue > 512) && (LE2 == HIGH)) {
digitalWrite(dirEL, HIGH);
digitalWrite(CLKe, HIGH);
delayMicroseconds(45);
digitalWrite(CLKe, LOW);
delayMicroseconds(45);
++encoder_El;
}
else if ((sensorValue < 512) && (LE1 == HIGH)) { //Si el interruptor es igual o superior a 512, el motor se moverá
en el sentido de las manecillas del reloj
digitalWrite(dirEL, LOW);
digitalWrite(CLKe, HIGH);
delayMicroseconds(45);

```

```

digitalWrite(CLKe, LOW);
delayMicroseconds(45);
--encoder_EI;
}

else {
digitalWrite(enEL, LOW); //Off
}

rot = 'n';

break;

case 's': //Parada general al pulsar ambos botones
while (Br == LOW && Bg == LOW) {
digitalWrite(enEL, LOW);
digitalWrite(enAZ, LOW);
}
rot = 'n';
break;
default: //Control automático

//Lectura de los valores analógicos del circuito fotodiodo
outA = (1023.0 - analogRead(signalA)) - offsetA;
outB = ((1023.0 - analogRead(signalB)) - offsetB) * (CoefB);
outC = ((1023.0 - analogRead(signalC)) - offsetC) * (CoefC);
outD = ((1023.0 - analogRead(signalD)) - offsetD) * (CoefD);

prom = (outA + outB + outC + outD) / 4.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
dl1 = (((outA + outD) - (outB + outC)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo de elevación

if (prom < cld || abs(dl1) < EP) //Los motores se detendrán cuando el valor de error permitido sea mayor que el
promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
{
digitalWrite(enEL, HIGH);
}
else if (abs(dl1) > EP) //Cuando los valores estén fuera del umbral, los motores funcionarán
{
digitalWrite(enEL, LOW);
if (dl1 > 0.0) {
digitalWrite(dirEL, HIGH); //Dirección de las manecillas del reloj
delayMicroseconds(45);
}
}
}

```

```

    digitalWrite(CLKe, HIGH);
    ++encoder_EI;
}
else
{
    digitalWrite(dirEL, LOW); //Dirección contraria a las manecillas del reloj
    digitalWrite(CLKe, HIGH);
    delayMicroseconds(45);
    --encoder_EI;
}
}

//Lectura de los valores analógicos del circuito fotodiodo
outA = (1023.0 - analogRead(signalA)) - offsetA;
outB = ((1023.0 - analogRead(signalB)) - offsetB) * (CoefB);
outC = ((1023.0 - analogRead(signalC)) - offsetC) * (CoefC);
outD = ((1023.0 - analogRead(signalD)) - offsetD) * (CoefD);

prom = (outA + outB + outC + outD) / 4.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
dl2 = (((outA + outB) - (outC + outD)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo azimutal

if (prom < cld || abs(dl2) < EP)
{
    digitalWrite(enAZ, HIGH);
}
else if (abs(dl2) > EP) //Cuando los valores estén fuera del umbral, los motores funcionarán
{
    digitalWrite(enAZ, LOW);
    if (dl2 > 0.0) {
        digitalWrite(dirAZ, HIGH); //Dirección de las manecillas del reloj
        delayMicroseconds(45);
        digitalWrite(CLKa, HIGH);
        ++encoder_Az;
    }
    else
    {
        digitalWrite(dirAZ, LOW); //Dirección contraria a las manecillas del reloj
        delayMicroseconds(45);
        digitalWrite(CLKa, HIGH);
        --encoder_Az;
    }
}

```

```
    }  
  }  
  
  digitalWrite(CLKa, LOW);  
  digitalWrite(CLKe, LOW);  
  delayMicroseconds(12000);  
  break;  
}  
}
```

ANEXO III. Código para caracterización de ángulo de elevación

Este fragmento de código se retoma de la sección de control automático del sistema de seguimiento solar. En específico, se encarga de controlar la elevación del dispositivo. Utiliza un bucle para realizar un movimiento automático en sentido horario, representado por el giro del motor que ajusta el ángulo de elevación. La variable “pasosEL” registra la cantidad de pasos dados en este proceso. El bucle se ejecuta hasta que se alcanza el límite de pasos predefinido (20,000 en este caso), momento en el cual se detiene el motor de elevación. Este código se utilizó para la calibración de los pasos del motor del eje de elevación en el sistema de seguimiento solar.

```
int pasosEL = 0;

default: //Control automático

    digitalWrite(enEL, LOW);
    delayMicroseconds(45);
    digitalWrite(dirEL, LOW); //Dirección en sentido de las manecillas del reloj

for (int i = 0; i < 20000; i++) {
    digitalWrite(CLKe, HIGH);
    delayMicroseconds(450);
    digitalWrite(CLKe, LOW);
    delayMicroseconds(450);
    pasosEL++;
    while (pasosEL >= 20000) {
        digitalWrite(enEL, HIGH); // Detener el motor de elevación
    }
}
```

ANEXO IV. Código para caracterización de ángulo azimut

Este fragmento de código se retoma de la sección de control automático del sistema de seguimiento solar, específicamente para ajustar el ángulo de azimut. Utiliza un bucle para realizar un movimiento automático en sentido horario, representado por el giro del motor que ajusta el ángulo de azimut. La variable “pasosAZ” registra la cantidad de pasos dados en este proceso. El bucle se ejecuta hasta que se alcanza el límite de pasos predefinido (20,000 en este caso), momento en el cual se detiene el motor de azimut. Este código se utilizó para la calibración de los pasos del motor del eje de azimut en el sistema de seguimiento solar.

```
int pasosAZ = 0;

default: //Control automático

    digitalWrite(enAZ, LOW);
    delayMicroseconds(45);
    digitalWrite(dirAZ, LOW); // Dirección en sentido de las manecillas del reloj

for (int i = 0; i < 20000; i++) {
    digitalWrite(CLKa, HIGH);
    delayMicroseconds(450);
    digitalWrite(CLKa, LOW);
    delayMicroseconds(450);
    pasosAZ++;
    while (pasosAZ >= 20000) {
        digitalWrite(enAZ, HIGH); // Detener el motor de azimut
    }
}
```

ANEXO V. Código de barrido para recopilación de datos para calibración

Este código realiza una adquisición continua para recopilar lecturas de los cuadrantes del fotodiodo, utilizados en el proceso de calibración. La activación de la adquisición es manual, al pulsar simultáneamente los dos botones del control manual. Durante la adquisición, se leen los valores analógicos de cuatro fotodiodos (cuadrantes A, B, C, y D), calculando el promedio y los errores de los ángulos de elevación y azimut. Los resultados se imprimen en serie junto con los valores individuales de los cuadrantes. Esto permite el procesamiento posterior de las lecturas y errores en función del tiempo, lo que a su vez permite estimar las propiedades estadísticas de las variables adquiridas y calculadas. Se adquieren 500 lecturas durante 125 segundos.

```
//Asignación de entradas y valores iniciales (Analógico)
int signalA = A3;
int signalB = A2;
int signalC = A1;
int signalD = A0;
int sensorPin = A4;
int outA = 0;
int outB = 0;
int outC = 0;
int outD = 0;
int sensorValue = 0;

//Asignación de pines digitales para relojes
int CLKe = 7;
int CLKa = 6;

//Asignación de pines digitales y valores iniciales de los botones
int redbutton = 2;
int greenbutton = 3;
int Br = 0;
int Bg = 0;

//Digital output assignment for direction and enable pins
float dirEL = 12;
float dirAZ = 11;
float enEL = 10;
float enAZ = 9;
```

```

//Asignación de salida digital para pines de dirección y habilitación
char rot = 'n';

//Botones de límites de eje
int limitE2 = 13;
int limitA2 = 8;
int limitE1 = 5;
int limitA1 = 4;
int LA1 = 0;
int LA2 = 0;
int LE1 = 0;
int LE2 = 0;

long encoder_Az = 0.0;
long encoder_El = 0.0;

float prom = 0.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
float dl2 = 0.0; //Cálculos de dirección para el ángulo azimutal
float dl1 = 0.0; //Cálculos de dirección para el ángulo de elevación
float cid = 500.0; //Valor de la nube
float EP = 0.002; // Error máximo permitido

unsigned long tiempoAnterior = 0;
unsigned long tiempoActual = 0;

bool valorImpreso = false; // Variable booleana para controlar si se ha impreso la variable

int i = 0;
int j = 0;
int k = 0;
int l = 0;
int m = 1;
int incre = 0;

void setup() {
  pinMode(signalA, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante A
  pinMode(signalB, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante B
  pinMode(signalC, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante C
  pinMode(signalD, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante D
  pinMode(redbutton, INPUT); //Botón rojo para el control manual del azimut
  pinMode(greenbutton, INPUT); //Botón verde para el control manual de la elevación

```

```

pinMode(dirEL, OUTPUT); // Dirección de elevación
pinMode(dirAZ, OUTPUT); // Dirección azimut
pinMode(enEL, OUTPUT); //Activar para elevación
pinMode(enAZ, OUTPUT); //Activar para azimut
pinMode(CLKe, OUTPUT); //Reloj de elevación
pinMode(CLKa, OUTPUT); //Reloj para azimut
pinMode(limitA1, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de azimut
pinMode(limitA2, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de azimut
pinMode(limitE1, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de elevación
pinMode(limitE2, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de elevación

Serial.begin (9600);
Serial.println ("LABEL, EL, AZ, AVERAGE, A, B, C, D, LA1, LA2, LE1, LE2");
}

void loop() {

LA1 = digitalRead(limitA1); //Lectura del valor digital del botón del límite de azimut 1
LA2 = digitalRead(limitA2); //Lectura del valor digital del botón del límite de azimut 2
LE1 = digitalRead(limitE1); //Lectura del valor digital del botón límite de elevación 1
LE2 = digitalRead(limitE2); //Lectura del valor digital del botón límite de elevación 2

if ((LA1 == LOW || LA2 == LOW) || (LE1 == LOW || LE2 == LOW)) { //Si los ángulos alcanzan el límite, los motores se
paran
    rot = 's'; //Cambiar el estado a parada general
}
else
{
    rot = 'n'; //El estado se mantiene en "n" si no se pulsan los microinterruptores de límite
}

Br = digitalRead(redbutton); //Lectura del valor digital del botón rojo
Bg = digitalRead(greenbutton); //Lectura del valor digital del botón verde

if (Br == LOW & Bg == HIGH) rot = 'a'; //Seleccionar caso en switch
if (Br == HIGH & Bg == LOW) rot = 'e'; //Seleccionar caso en switch

switch (rot) {
case 'a': //Control manual del azimut
    digitalWrite(enAZ, LOW); //Habilitación del motor de azimut desactivada
    digitalWrite(CLKe, LOW); //El reloj de ángulo de elevación está desactivado para este estado
    sensorValue = analogRead(sensorPin);

```

```

if ((sensorValue >= 512) && (LA1 == HIGH)) {
    digitalWrite(dirAZ, HIGH);
    digitalWrite(CLKa, HIGH);
    delayMicroseconds(45);
    digitalWrite(CLKa, LOW);
    delayMicroseconds(45);

}

else if ((sensorValue < 512) && (LA2 == HIGH)) { //Si el interruptor es igual o superior a 512, el motor se moverá
en el sentido de las manecillas del reloj
    digitalWrite(dirAZ, LOW);
    digitalWrite(CLKa, HIGH);
    delayMicroseconds(45);
    digitalWrite(CLKa, LOW);
    delayMicroseconds(45);
}

else {
    digitalWrite(enAZ, LOW); //Off
}

rot = 'n';

break;

case 'e': //Control manual de elevación
    digitalWrite(enEL, LOW); //Habilitación desde elevación motor desactivado
    digitalWrite(CLKa, LOW); //El reloj de ángulo azimutal está desactivado para este estado
    sensorValue = analogRead(sensorPin);

if ((sensorValue > 512) && (LE2 == HIGH)) {
    digitalWrite(dirEL, HIGH);
    digitalWrite(CLKe, HIGH);
    delayMicroseconds(45);
    digitalWrite(CLKe, LOW);
    delayMicroseconds(45);

}

else if ((sensorValue < 512) && (LE1 == HIGH)) { //Si el interruptor es igual o superior a 512, el motor se moverá
en el sentido de las manecillas del reloj
    digitalWrite(dirEL, LOW);
    digitalWrite(dirEL, LOW);

```

```

digitalWrite(CLKe, HIGH);
delayMicroseconds(45);
digitalWrite(CLKe, LOW);
delayMicroseconds(45);
}

else {
digitalWrite(enEL, LOW); //Off
}

rot = 'n';

break;

default: //
if (Br == LOW & Bg == LOW) {

digitalWrite(enEL, LOW);
digitalWrite(enAZ, LOW);
digitalWrite(dirAZ, HIGH);
digitalWrite(dirEL, HIGH);

for (int i = 0; i < 500; i ++) {

outA = 1023.0 - analogRead(signalA);
outB = 1023.0 - analogRead(signalB);
outC = 1023.0 - analogRead(signalC);
outD = 1023.0 - analogRead(signalD);
prom = (outA + outB + outC + outD) / 4.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
dl2 = (((outA + outB) - (outC + outD)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo azimutal
dl1 = (((outA + outD) - (outB + outC)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo de elevación
Serial.println(";" + String(dl1, 6) + ";" + String(dl2, 6) + ";" + String(prom) + ";" + String(outA) + ";" + String(outB) +
";" + String(outC) + ";" + String(outD));
delay(250);
}
}
}
}
}

```

ANEXO VI. Código para barrido en plano bidimensional

Este código realiza un barrido en un plano bidimensional de 11x13 puntos para recopilar datos de los valores de los cuadrantes del fotodiodo, utilizados en el proceso de calibración. La activación del barrido se produce cuando se pulsán simultáneamente los dos botones del control manual. Durante el barrido, se leen los valores analógicos de cuatro fotodiodos (cuadrantes A, B, C, y D) en cada posición del plano, calculando el promedio y los errores de los ángulos de elevación y azimut. Los resultados se imprimen en serie junto con los valores individuales de los cuadrantes.

```
//Asignación de entradas y valores iniciales (Analógico)
```

```
int signalA = A3;  
int signalB = A2;  
int signalC = A1;  
int signalD = A0;  
int sensorPin = A4;  
int outA = 0;  
int outB = 0;  
int outC = 0;  
int outD = 0;  
int sensorValue = 0;
```

```
//Asignación de pines digitales para relojes
```

```
int CLKe = 7;  
int CLKa = 6;
```

```
//Asignación de pines digitales y valores iniciales de los botones
```

```
int redbutton = 2;  
int greenbutton = 3;  
int Br = 0;  
int Bg = 0;
```

```
//Digital output assignment for direction and enable pins
```

```
float dirEL = 12;
```

```

float dirAZ = 11;
float enEL = 10;
float enAZ = 9;

//Asignación de salida digital para pines de dirección y habilitación
char rot = 'n';

//Botones de límites de eje
int limitE2 = 13;
int limitA2 = 8;
int limitE1 = 5;
int limitA1 = 4;
int LA1 = 0;
int LA2 = 0;
int LE1 = 0;
int LE2 = 0;

long encoder_Az = 0.0;
long encoder_El = 0.0;

float prom = 0.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del fotodiodo
float dl2 = 0.0; //Cálculos de dirección para el ángulo azimutal
float dl1 = 0.0; //Cálculos de dirección para el ángulo de elevación
float cld = 150.0; //Valor de la nube
float EP = 0.002; // Error máximo permitido
float offsetA = 27.0;
float offsetB = 28.0;
float offsetC = 25.0;
float offsetD = 26.0;
float CoefB = 1.00096;
float CoefC = 1.00085;
float CoefD = 1.0074;

```

```

unsigned long tiempoAnterior = 0;
unsigned long tiempoActual = 0;

bool valorImpreso = false; // Variable booleana para controlar si se ha impreso la variable

int i = 0;
int j = 0;
int k = 0;
int l = 0;
int m = 1;
int incre = 0;

void setup() {
  pinMode(signalA, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante A
  pinMode(signalB, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante B
  pinMode(signalC, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante C
  pinMode(signalD, INPUT); //Entrada del fotodiodo Cuadrante D
  pinMode(redbutton, INPUT); //Botón rojo para el control manual del azimut
  pinMode(greenbutton, INPUT); //Botón verde para el control manual de la elevación
  pinMode(dirEL, OUTPUT); // Dirección de elevación
  pinMode(dirAZ, OUTPUT); // Dirección azimut
  pinMode(enEL, OUTPUT); //Activar para elevación
  pinMode(enAZ, OUTPUT); //Activar para azimut
  pinMode(CLKe, OUTPUT); //Reloj de elevación
  pinMode(CLKa, OUTPUT); //Reloj para azimut
  pinMode(limitA1, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de azimut
  pinMode(limitA2, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de azimut
  pinMode(limitE1, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de elevación
  pinMode(limitE2, INPUT); //Interruptor para el ángulo límite de elevación

  Serial.begin (9600);
  Serial.println ("LABEL, EL, AZ, AVERAGE, A, B, C, D, LA1, LA2, LE1, LE2");
}

```

```

void loop() {

    LA1 = digitalRead(limitA1); //Lectura del valor digital del botón del límite de azimut 1
    LA2 = digitalRead(limitA2); //Lectura del valor digital del botón del límite de azimut 2
    LE1 = digitalRead(limitE1); //Lectura del valor digital del botón límite de elevación 1
    LE2 = digitalRead(limitE2); //Lectura del valor digital del botón límite de elevación 2

    if ((LA1 == LOW || LA2 == LOW) || (LE1 == LOW || LE2 == LOW)) { //Si los ángulos alcanzan el
límite, los motores se paran
        rot = 's'; //Cambiar el estado a parada general
    }
    else
    {
        rot = 'n'; //El estado se mantiene en "n" si no se pulsan los microinterruptores de límite
    }

    Br = digitalRead(redbutton); //Lectura del valor digital del botón rojo
    Bg = digitalRead(greenbutton); //Lectura del valor digital del botón verde

    if (Br == LOW & Bg == HIGH) rot = 'a'; //Seleccionar caso en switch
    if (Br == HIGH & Bg == LOW) rot = 'e'; //Seleccionar caso en switch

    switch (rot) {
        case 'a': //Control manual del azimut
            digitalWrite(enAZ, LOW); //Habilitación del motor de azimut desactivada
            digitalWrite(CLKe, LOW); //El reloj de ángulo de elevación está desactivado para este estado
            sensorValue = analogRead(sensorPin);

            if ((sensorValue >= 512) && (LA1 == HIGH)) {
                digitalWrite(dirAZ, HIGH);
                digitalWrite(CLKa, HIGH);
                delayMicroseconds(45);
                digitalWrite(CLKa, LOW);
                delayMicroseconds(45);
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    else if ((sensorValue < 512) && (LA2 == HIGH)) { //Si el interruptor es igual o superior a 512,
el motor se moverá en el sentido de las manecillas del reloj
        digitalWrite(dirAZ, LOW);
        digitalWrite(CLKa, HIGH);
        delayMicroseconds(45);
        digitalWrite(CLKa, LOW);
        delayMicroseconds(45);
    }

    else {
        digitalWrite(enAZ, LOW); //Off
    }

    rot = 'n';

    break;

case 'e': //Control manual de elevación
    digitalWrite(enEL, LOW); //Habilitación desde elevación motor desactivado
    digitalWrite(CLKa, LOW); //El reloj de ángulo azimutal está desactivado para este estado
    sensorValue = analogRead(sensorPin);

    if ((sensorValue > 512) && (LE2 == HIGH)) {
        digitalWrite(dirEL, HIGH);
        digitalWrite(CLKe, HIGH);
        delayMicroseconds(45);
        digitalWrite(CLKe, LOW);
        delayMicroseconds(45);
    }
    else if ((sensorValue < 512) && (LE1 == HIGH)) { //Si el interruptor es igual o superior a 512,
el motor se moverá en el sentido de las manecillas del reloj
        digitalWrite(dirEL, LOW);

```

```

    digitalWrite(CLKe, HIGH);
    delayMicroseconds(45);
    digitalWrite(CLKe, LOW);
    delayMicroseconds(45);
}

else {
    digitalWrite(enEL, LOW); //Off
}

rot = 'n';

break;

default: //

int spA = 700;
int spE = 300;
int delayAz = 1000;
int delayEI = 600;
int gridAz = 13;
int gridEI = 11;

if (Br == LOW & Bg == LOW) {

    digitalWrite(enEL, LOW);
    digitalWrite(enAZ, LOW);
    digitalWrite(dirAZ, HIGH);
    digitalWrite(dirEL, HIGH);

    for (int i = 1; i <= (gridAz - 1) / 2 ; i ++ ) {

        for (int k = 1; k <= spA; k ++ ) {
            digitalWrite(CLKa, HIGH);

```

```

    delayMicroseconds(delayAz);
    digitalWrite(CLKa, LOW);
    delayMicroseconds(delayAz);
}
}
for (int j = 1; j <= (gridEl - 1) / 2 ; j ++ ) {

    for (int l = 1; l <= spE; l ++ ) {
        digitalWrite(CLKe, HIGH);
        delayMicroseconds(delayEl);
        digitalWrite(CLKe, LOW);
        delayMicroseconds(delayEl);
    }
}
digitalWrite(dirAZ, LOW);
// start scanning
for (int i = 1; i <= gridAz; i ++ ) {

    for (int k = 1; k <= spA; k ++ ) {
        digitalWrite(CLKa, HIGH);
        delayMicroseconds(delayAz);
        digitalWrite(CLKa, LOW);
        delayMicroseconds(delayAz);
    }

    if (i % 2 == 0) {
        digitalWrite(dirEL, HIGH);
        incre = -1;
    }
    else
    {
        digitalWrite(dirEL, LOW);
        incre = 1;
    }
}

```

```

for (int j = 1; j <= gridEI; j ++) {

    if (j != 1) {
        for (int l = 1; l <= spE; l ++) {
            digitalWrite(CLKe, HIGH);
            delayMicroseconds(delayEI);
            digitalWrite(CLKe, LOW);
            delayMicroseconds(delayEI);
        }
        m = m + incre;
    }
    outA = (1023.0 - analogRead(signalA)) - offsetA;
    outB = ((1023.0 - analogRead(signalB)) - offsetB) * (CoefB);
    outC = ((1023.0 - analogRead(signalC)) - offsetC) * (CoefC);
    outD = ((1023.0 - analogRead(signalD)) - offsetD) * (CoefD);
    prom = (outA + outB + outC + outD) / 4.0; //Promedio de los valores de los cuadrantes del
fotodiodo
    dl2 = (((outA + outB) - (outC + outD)) / (float) prom); ////Cálculos de dirección para el ángulo
azimutal
    dl1 = (((outA + outD) - (outB + outC)) / (float) prom); //Cálculos de dirección para el ángulo
de elevación
    Serial.println("; " + String(i) + "; " + String(m) + "; " + String(dl1, 6) + "; " + String(dl2, 6) + "; "
+ String(prom) + "; " + String(outA) + "; " + String(outB) + "; " + String(outC) + "; " + String(outD));
    }
}

digitalWrite(CLKa, LOW);
digitalWrite(CLKe, LOW);
delay(1000);
break;
}
}
}

```

ANEXO VII. Programa de LabVIEW para proceso de datos obtenidos a partir del barrido

Para llevar a cabo el procesamiento de datos, se siguen los siguientes pasos. Primero, se abre el archivo escaneado para acceder a la información recolectada. Posteriormente, se organizan los datos en categorías como pasos, errores y señales de fotodiodos, entre otros, para facilitar su manipulación. A continuación, se realiza una transformación de la forma de los datos, pasando de una estructura 1D a una 2D para una representación en el plano bidimensional formado por los ángulos de elevación y azimut. Se ejecuta la eliminación de la inversión de coordenadas espaciales originada durante el barrido.

Seguidamente, se reproduce el escaneo con el propósito de identificar ángulos de azimut y elevación en relación con los errores registrados. Se generan gráficos tridimensionales que visualizan de manera efectiva tanto los errores como las señales de los cuatro cuadrantes del fotodiodo y su estadística, proporcionando una representación gráfica significativa.

Luego, se calibra el error adimensional de elevación mediante un ajuste de línea, con el objeto de convertirlo a grados. Similarmente, se realiza la calibración del error de azimut mediante el ajuste de línea correspondiente. Estos procesos de calibración se reproducen para cada línea de escaneo de elevación y azimutal. Finalmente, se recuperan las pendientes de los ajustes lineales más cercanos al centro del barrido, alrededor del punto de mínimo error compuesto. Esto se justifica porque idealmente el sistema operará en esa región durante una jornada de seguimiento exitoso.

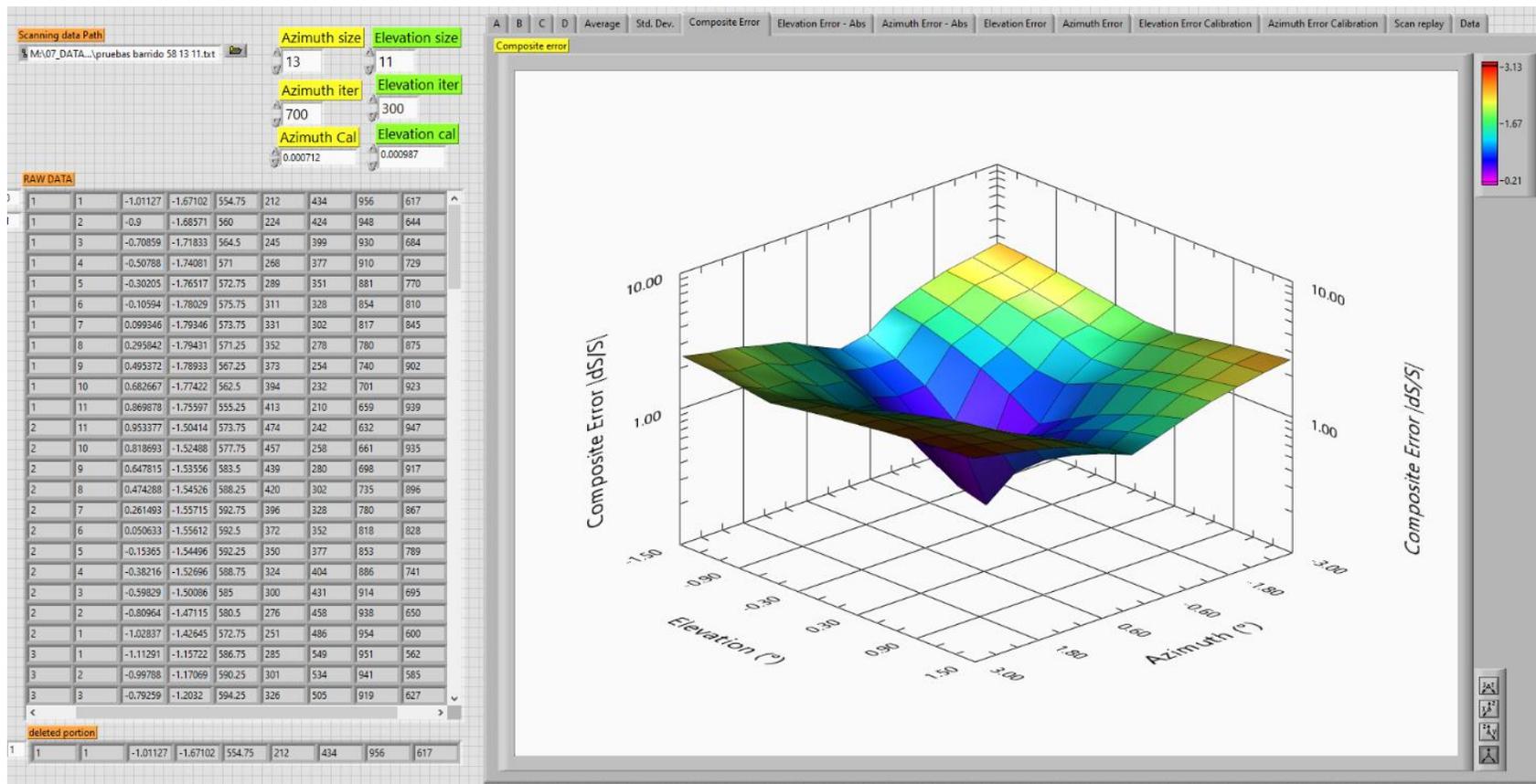


Figura 1. Panel frontal del programa de gestión de datos.

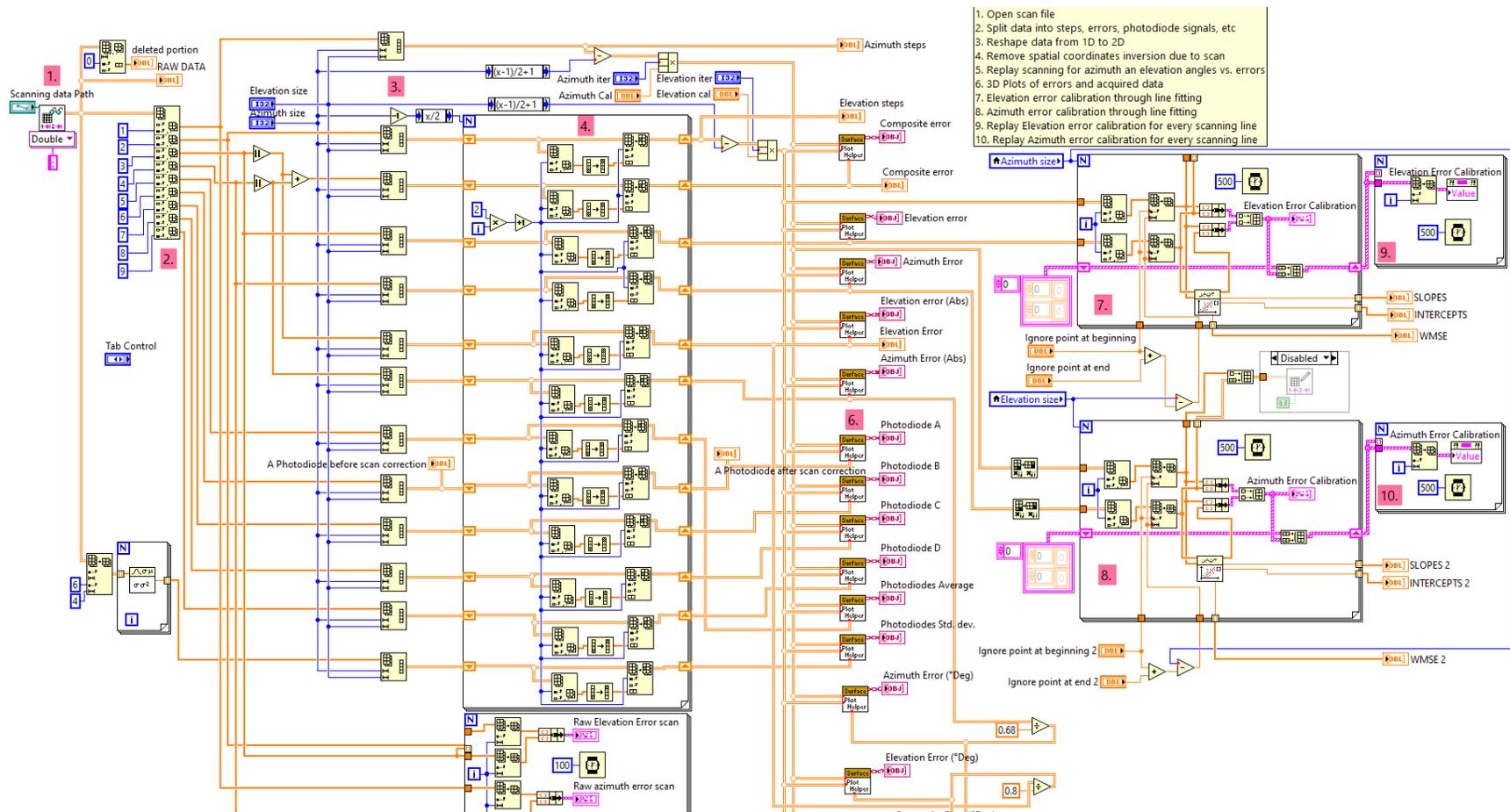


Figura 2. Diagrama del programa de gestión de datos.