

Mejoramiento del desempeño del seguidor solar de dos grados de libertad ubicado piso 5 del
Edificio de Ingeniería Eléctrica - Fase 1

Juan Alejandro Ortiz Sepúlveda y Carlos David Bautista León

Trabajo de grado presentando para optar por el título de Profesional en Ingeniería Eléctrica y
Electrónica

Director

German Osma Pinto

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Marco teórico	12
1.1 Seguidor solar	12
1.2 Encoders en sistemas de seguimiento solar	12
1.2.1 Encoders rotativos mecánicos	13
1.2.2 Encoders ópticos	13
2. Desarrollo de la solución	14
2.1 Diagnóstico inicial del sistema	14
2.1.1 Fallas en el control de movimiento	15
2.1.2 Baja Precisión en el seguimiento solar	16
2.1.3 Problemas en la alimentación eléctrica	17
2.1.4 Deficiencias en la estructura mecánica	18
2.1.5 Filtraciones en el gabinete de control	20
2.1.6 Falta de protecciones en el software de control	21
2.2 Implementación del hardware	22
2.2.1 Reemplazo del controlador L298N	22
2.2.1.1 Implementación de un arranque progresivo en los motores.	23
2.2.1.2 Uso de un driver L298N independiente para cada motor.	23
2.2.2 Instalación de nuevos encoder rotativos	25
2.2.3 Recableado del sistema	30

2.2.4 Instalación y reparación de la UPS	31
2.2.5 Refuerzo del eje del piñón de elevación	32
2.2.6 Sellado del gabinete de control	34
2.3 Mejora del software de control	35
2.3.1 Calibración de los encoder	35
2.3.2 Ajuste y mejora de la programación del sistema	37
2.3.2.1 Implementación de protecciones de movimiento.	37
2.3.2.2 Ajuste de la programación en la Raspberry Pi 3 B+.	38
3. Resultados obtenidos	40
3.1 Mejoras del movimiento en azimut y elevación	40
3.2 Seguimiento Solar Mejorado	43
3.3 Estabilidad y protección del sistema.....	45
3.3.1 Mejoras Físicas Implementadas.....	46
3.3.2 Implementación de Protecciones en el Código.....	46
4. Conclusiones.....	47
4.1 Evaluación de los Objetivos Iniciales	47
4.2 Patrones y tendencias identificadas	48
4.3 Restricciones y desafíos identificados	48
4.4 Impacto y contribución del proyecto	49
5. Recomendaciones	50
Referencias.....	51
Apéndices.....	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características del encoder rotativo KY-040.....	26
Tabla 2. Comparación entre la Programación Anterior y la Mejorada.....	39

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Descripción del estado inicial y mejoras realizadas en el seguidor solar.....	11
Figura 2. Driver L298N dañado y mediciones de continuidad que evidencian su falla	16
Figura 3. Encoder HW-040 en estado de sulfatación y deterioro	17
Figura 4. Verificación de batería defectuosa en la UPS.	18
Figura 5. Desgaste en el eje del piñón de elevación	19
Figura 6. Inclinação del paral del piranómetro.....	20
Figura 7. Seguidor solar atascado debido a la falta de protecciones	22
Figura 8. Drivers L298N instalados en el sistema y distribución independiente para cada motor.....	24
Figura 9. Encoder rotativo KY-040 y su instalación en el seguidor solar	26
Figura 10. Señales del encoder HW-040 inicialmente instalado para ambos ejes.....	28
Figura 11. Señales del encoder KY-040 y su mejora en la precisión.	29
Figura 12. Proceso de recableado del seguidor solar	31
Figura 13. Reemplazo de la batería y reinstalación de la UPS	32
Figura 14. Desmontaje del panel para reparación del eje y mantenimiento general.	33
Figura 15. Instalación de sellos en el gabinete de control	35
Figura 16. Pruebas de calibración de los encoder con medición de inclinación y brújula	37
Figura 17. Esquema de los niveles de azimut y elevación antes de la mejora.....	41
Figura 18. Esquema de los niveles de azimut y elevación después de la mejora.	42
Figura 19. Registro del seguimiento solar en distintos horarios del día.	44

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Esquemático de conexiones físicas del seguidor solar	52
Apéndice B. Mapa de conexiones del sistema de seguimiento solar.....	53
Apéndice C. Plan de Futuras Intervenciones	54
Apéndice D. Comparativa de Encoders y Sensor de Velocidad.....	56
Apéndice E Video Explicativo del uso general de los archivos	57
Apéndice F Video sobre como realizar la calibración del sistema	57
Apéndice G Repositorio GITHUB de los códigos.....	57
Apéndice H. Diagrama Solid	58
Apéndice I. Diagrama de estructura modular del software implementado.....	59
Apéndice J. Algoritmo de Control.....	60

Resumen

Título: Mejoramiento del desempeño del seguidor solar de dos grados de libertad ubicado piso 5 del Edificio de Ingeniería Eléctrica - Fase 1*

Autores: Juan Alejandro Ortiz Sepúlveda y Carlos David Bautista León**

Palabras clave: Seguidor solar, Energía renovable, Sostenibilidad energética, Algoritmos de control, Mantenimiento, Obsolescencia de componentes.

Descripción

El seguimiento solar es una tecnología clave para maximizar la captura de energía fotovoltaica, lo que permite una mayor eficiencia en los sistemas solares. Este proyecto mejoró el seguidor solar de dos ejes ubicado en el quinto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (UIS). El seguidor presentaba problemas que comprometían su funcionamiento, como la avería recurrente del controlador L298N, fallos en la estabilidad y la continuidad del funcionamiento, errores en el sistema de seguimiento y deficiencias en la protección contra fluctuaciones de tensión.

Para mejorar su desempeño, se implementaron las siguientes estrategias: actualización de componentes electrónicos, sustitución de los sensores de elevación y azimut por otros de mayor resolución, recableado completo del sistema e instalación de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) que permite proteger el sistema ante cortes de energía y variaciones de tensión asegurando el funcionamiento continuo del sistema. Además, se mejoró el software de control con nuevas protecciones que garantizan el movimiento seguro del sistema.

Como resultado, se incrementó la precisión del seguimiento solar, pasando de tres a cuatro niveles de orientación de elevación y de doce a cuarenta niveles de azimut. Estas mejoras propenden por el desempeño del seguidor favoreciendo su uso como herramienta de investigación en energía solar en la E3T.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director: German Osma Pinto

Abstract

Title: Improvement of the performance of the two-degrees-of-freedom solar tracker located on the 5th floor of the Electrical Engineering Building - Phase 1*

Authors: Juan Alejandro Ortiz Sepúlveda y Carlos David Bautista León**

Keywords: Solar tracker, Renewable energy, Energy sustainability, Control algorithms, Maintenance, Component obsolescence.

Description

Solar tracking is a key technology for maximizing photovoltaic energy capture, enabling greater efficiency in solar systems. This project improved the dual-axis solar tracker located on the fifth floor of the Electrical Engineering Building at the Industrial University of Santander (UIS). The tracker was experiencing issues that compromised its operation, such as recurring failures of the L298N controller, failures in stability and continuity of operation, errors in the tracking system, and deficiencies in protection against voltage fluctuations.

To improve its performance, the following strategies were implemented: upgrading electronic components, replacing the elevation and azimuth sensors with higher-resolution ones, completely rewiring the system, and installing an Uninterruptible Power Supply (UPS) to protect the system from power outages and voltage variations, ensuring continuous operation. Additionally, the control software was improved with new protections that guarantee the safe movement of the system.

As a result, solar tracking accuracy was increased from three to four elevation orientation levels and from twelve to forty azimuth levels. These improvements enhance the tracker's performance, favoring its use as a solar energy research tool at the E3T.

* Work of Grade

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director: German Osma Pinto

Introducción

En un mundo donde la demanda energética sigue en aumento y los efectos del cambio climático se hacen cada vez más evidentes, la transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en una necesidad urgente.

La energía solar, en particular, se ha consolidado como una de las soluciones más viables y sostenibles debido a su disponibilidad y bajo impacto ambiental. Sin embargo, la eficiencia en la captación de energía solar sigue siendo un desafío, ya que los paneles fotovoltaicos deben estar correctamente alineados con la posición del sol para maximizar su rendimiento. Para abordar este problema, se han desarrollado los seguidores solares, dispositivos capaces de ajustar la orientación de los paneles a lo largo del día, aumentando significativamente la cantidad de energía capturada en comparación con sistemas fijos. Estos dispositivos han sido objeto de numerosas investigaciones para mejorar su precisión, estabilidad y eficiencia, mejorando así el aprovechamiento de la energía solar en diferentes aplicaciones.

En la Universidad Industrial de Santander (UIS), el seguidor solar de dos ejes ubicado en el quinto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica juega un papel clave en la investigación y experimentación en el área de energías renovables. Este sistema, con una capacidad instalada de 250 W, permite estudiar el comportamiento de la energía solar en la región y evaluar estrategias para mejorar su eficiencia. No obstante, con el paso del tiempo, se han identificado diversas fallas que han afectado su operación continua y precisión en el movimiento, comprometiendo su capacidad de seguimiento y reduciendo su utilidad como plataforma de investigación. Entre las principales problemáticas encontradas, se identifican fallos en los componentes electrónicos,

deficiencias en el sistema de control, desgaste mecánico en las estructuras y afectaciones por factores ambientales.

Uno de los problemas más críticos detectados fue la avería recurrente del driver L298N, lo que impidió el correcto funcionamiento de los motores encargados del movimiento del seguidor. Además, los encoder rotativos utilizado presentaban una baja resolución, lo que limitaba el número de posiciones de seguimiento y reducía la capacidad de ajuste del sistema, restringiéndolo a solo tres niveles de orientación en elevación y doce niveles en azimut. Además, se observaron fallos en la fuente de alimentación, lo que generaba fluctuaciones de voltaje que afectaban a los módulos electrónicos y provocaban daños en otros componentes del sistema.

En términos estructurales, se evidenciaron problemas en el paral donde se encuentran los sensores climáticos, cuya inclinación podía alterar la precisión de las mediciones, y se detectó un desgaste en el eje del piñón de elevación, que impidió la correcta movilidad del sistema. Finalmente, el software de control presentaba deficiencias en la implementación de protecciones contra movimientos no deseados, lo que llevó a daños severos en el cableado tras un fallo en los finales de carrera.

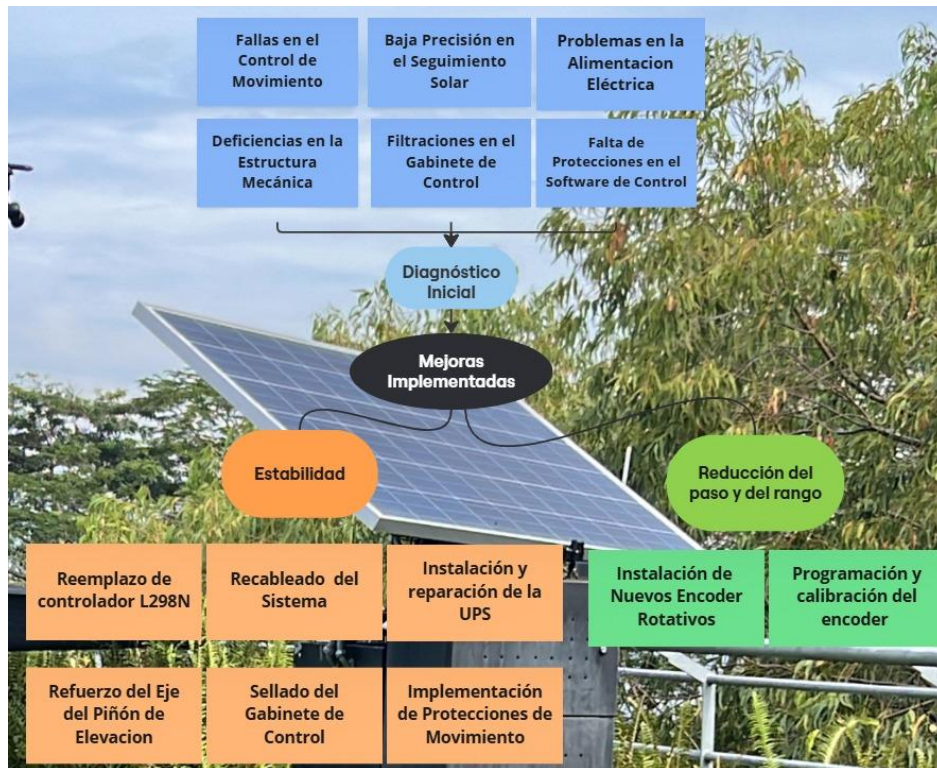
Para solucionar estas problemáticas, se propuso una intervención integral que comprendió tanto mejoras físicas como de software del sistema. Se llevó a cabo el reemplazo de componentes electrónicos, incluyendo la sustitución del controlador L298N y la instalación de una UPS para proteger el sistema contra fluctuaciones de voltaje. En términos de precisión, se implementó un encoder KY-040, lo que permitió aumentar el número de niveles de orientación en elevación y azimut, mejorando así la capacidad de ajuste y captación de energía solar. Además, se realizó el recableado eliminando cables obsoletos y dañados, y se reforzó la estructura del seguidor para garantizar su estabilidad. En el software de control, se desarrollaron nuevas protecciones que

evitaron movimientos incontrolados y se ajustaron los algoritmos para mejorar la eficiencia del seguimiento solar.

Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en la estabilidad, precisión y confiabilidad del seguidor solar, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de la radiación solar y una mayor calidad de los datos obtenidos para futuras investigaciones. Además, la implementación de mecanismos de protección y mantenimiento preventivo prolonga la vida útil del sistema y reduce la necesidad de intervenciones correctivas frecuentes.

Figura 1.

Descripción del estado inicial y mejoras realizadas en el seguidor solar.



Nota: La figura representa el diagrama del proceso de mejoramiento del sistema del seguidor solar, desde el diagnóstico inicial hasta la implementación de mejoras en control, mecánica y precisión del movimiento.

1. Marco teórico

1.1 Seguidor solar

Los seguidores solares son sistemas mecánicos y electrónicos diseñados para orientar los paneles fotovoltaicos en la dirección del sol con el objetivo de aumentar la captación de energía.

Existen principalmente dos tipos de seguidores solares:

- Seguidores de un eje: permiten la rotación del panel en un solo plano, ya sea horizontal o vertical.
- Seguidores de dos ejes: permiten el ajuste en los planos horizontal y vertical, logrando una alineación óptima con el sol en todo momento.

Los seguidores de dos ejes, aunque más complejos en su implementación, ofrecen un mayor rendimiento energético al mantener una orientación precisa del panel fotovoltaico a lo largo del día y el año.

1.2 Encoders en sistemas de seguimiento solar

Los Encoders son dispositivos utilizados para medir la posición angular o el desplazamiento de un eje rotatorio. En los seguidores solares, permiten monitorear la orientación del panel y enviar información al sistema de control para realizar ajustes precisos en su posición.

Existen dos tipos principales de codificadores:

1.2.1 Encoders rotativos mecánicos

Estos encoders generan señales eléctricas a partir de contactos físicos internos en función de la rotación del eje. A pesar de ser más económicos y tener una resolución moderada, su principal ventaja es la capacidad de detectar el movimiento en ambos sentidos de giro, lo que los hace ideales para aplicaciones donde es fundamental conocer la dirección del desplazamiento. Sin embargo, debido al contacto mecánico, pueden presentar cierto desgaste con el tiempo.

1.2.2 Encoders ópticos

Los encoders ópticos son dispositivos electromecánicos que producen señales eléctricas basadas en la interrupción de un haz de luz a través de un disco con patrones específicos. Ofrecen una mayor resolución y precisión, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta velocidad y precisión. No obstante, su principal limitación es que, en algunos casos, solo detectan cambios en la velocidad sin determinar la dirección del movimiento, lo que restringe su uso en sistemas que requieran información sobre el sentido de giro.

La resolución de un encoder se mide en pulsos por revolución (PPR) y su elección influye en la cantidad de posiciones detectables dentro de un rango de movimiento.

2. Desarrollo de la solución

El desarrollo de este proyecto tuvo como propósito principal el mejoramiento del seguidor solar de dos ejes ubicado en el quinto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Inicialmente, este sistema presentaba múltiples fallas que afectaban su operatividad, incluyendo problemas en los componentes electrónicos, deficiencias en el software de control, inestabilidad estructural y una baja precisión en el seguimiento del sol.

Para abordar estas problemáticas, se diseñó una solución integral que incluyó mejoras en el hardware, implementación de nuevas estrategias de control y mejoras en el software. Este capítulo documenta en detalle las fases del proceso de desarrollo, las metodologías utilizadas, los problemas técnicos encontrados y las soluciones implementadas. Además, se presentan los resultados obtenidos y su impacto en la confiabilidad del seguidor solar.

2.1 Diagnóstico inicial del sistema

Antes de definir la estrategia de mejoramiento, se realizó un diagnóstico exhaustivo del estado del seguidor solar. Durante esta fase, se identificaron diversas deficiencias que comprometían su correcto funcionamiento:

2.1.1 Fallas en el control de movimiento

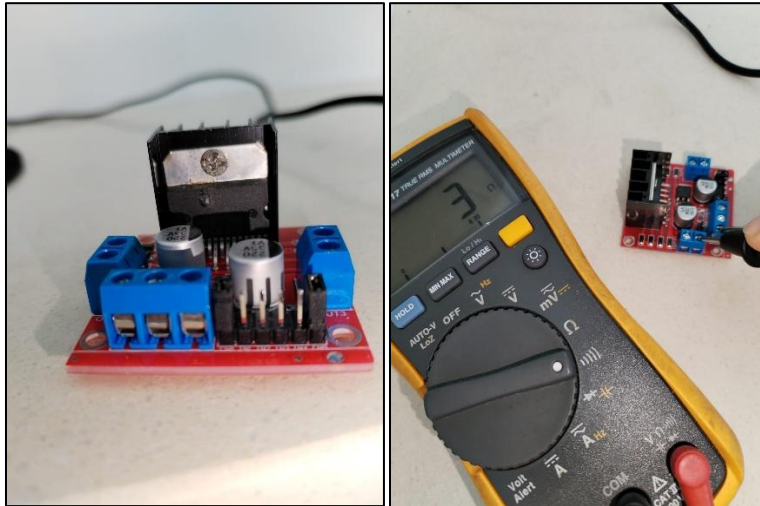
Uno de los principales problemas detectados fue la falta de respuesta de los motores, lo que impidió que el seguidor realizara los movimientos de ajuste en azimut y elevación. Tras una inspección detallada, se descubrió que el driver L298N estaba quemado, lo que impedía la activación de los motores.

Se evidenció que la falla no solo se debía al deterioro del componente, sino a picos de corriente generados en el arranque del motor, los cuales superaban la capacidad de resistencia del driver, provocando su sobrecalentamiento y posterior falla. Esta situación se presentaba de manera recurrente, lo que indicaba la necesidad de implementar un sistema de protección contra sobrecorrientes, mejorando la configuración del control de arranque.

La Figura 2 muestra el estado del driver L298N observándose signos visibles de daño por sobrecalentamiento. Además, se presentan las mediciones de continuidad realizadas, en las cuales se evidenció continuidad entre los pines de alimentación y salida del driver, confirmando su mal estado y la necesidad de reemplazo.

Figura 2.

Driver L298N dañado y mediciones de continuidad que evidencian su falla



Nota: Las imágenes representan, a la izquierda el driver L298N dañado con signos de sobrecalentamiento y, a la derecha, las pruebas de continuidad que confirman su falla y necesidad de reemplazo.

2.1.2 Baja Precisión en el seguimiento solar

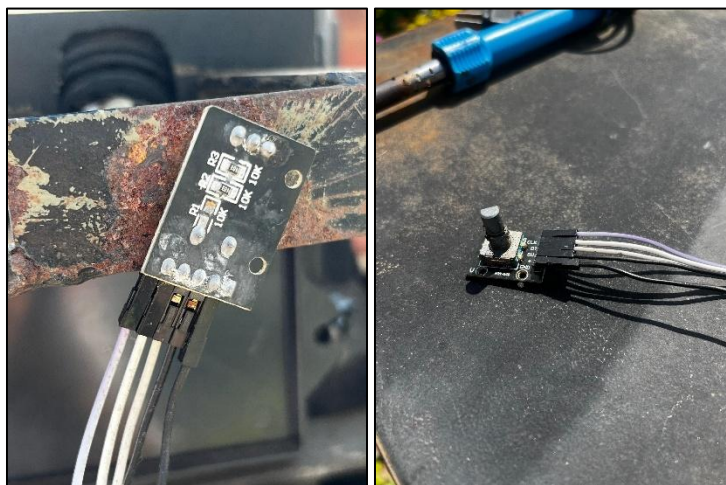
El sistema contaba con un encoder rotativo de baja resolución, lo que limitaba la capacidad del seguidor para realizar ajustes finos en la orientación del panel. Esta limitación generaba una falta de alineación óptima con la trayectoria solar, reduciendo la eficiencia de captación de energía.

Además, durante la inspección del sistema se encontró que el encoder HW-040 presentaba sulfatación y signos de corrosión, lo que pudo afectar aún más la precisión del seguimiento. El deterioro de los contactos eléctricos comprometía la correcta detección de posición, generando posibles errores en la señal de retroalimentación y dificultando el control del movimiento del panel solar.

La Figura 3 muestra el estado del encoder HW-040 encontrado en el sistema, se evidencia corrosión en la placa, sulfatación en las pistas de conexión y deterioro en los pines de conexión, lo que compromete su correcto funcionamiento

Figura 3.

Encoder HW-040 en estado de sulfatación y deterioro



Nota: Las imágenes representan el estado del encoder HW-040, con signos de corrosión, sulfatación y desgaste en sus conexiones, afectando su funcionamiento

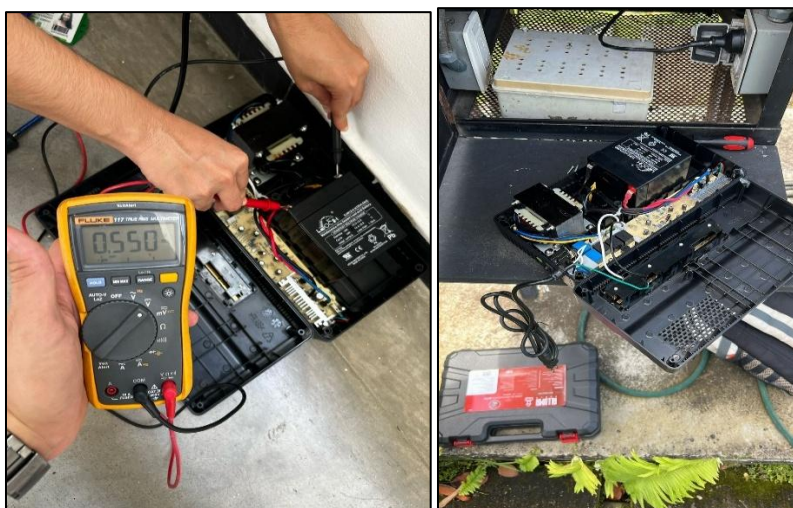
2.1.3 Problemas en la alimentación eléctrica

Se detectaron fluctuaciones de tensión que afectaron el rendimiento del sistema y provocaron daños en los módulos electrónicos. Para mitigar estos efectos, se había instalado un UPS para estabilizar el suministro eléctrico. Sin embargo, durante las pruebas iniciales, se encontró que la UPS había dejado de funcionar debido a una batería dañada, la cual requería reemplazo.

La Figura 4 muestra el procedimiento de diagnóstico de la batería de la UPS. Se observa la conexión de las puntas de prueba del multímetro digital Fluke 117 sobre los terminales de la batería, registrando una tensión de 0,550 V, lo que indica que la batería se encuentra dañada y debe ser reemplazada.

Figura 4.

Verificación de batería defectuosa en la UPS.



Nota: La imagen representan el diagnóstico de la batería de la UPS, donde el multímetro Fluke 117 mide 0,550 V, señalando la necesidad de reemplazo.

2.1.4 Deficiencias en la estructura mecánica

Durante la inspección del sistema, se identificaron fallas mecánicas que afectan el desempeño del seguidor solar y la precisión de las mediciones.

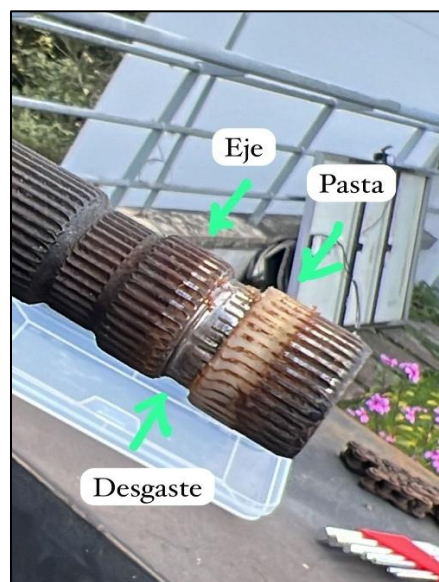
Uno de los problemas detectados fue el desgaste en el eje del piñón de elevación, lo que provocaba deslizamientos en la rotación del seguidor. Este desgaste generaba movimientos

imprecisos, afectando la alineación óptima del panel solar y reduciendo la eficiencia del sistema (Figura 5).

Asimismo, se encontró una desviación en el paral donde estaba montado el piranómetro, lo que comprometía la precisión de las mediciones de radiación solar. Esta inclinación inadecuada podía generar errores en la estimación de la irradiancia efectiva recibida por los paneles solares (Figura 6).

Figura 5.

Desgaste en el eje del piñón de elevación



Nota: La imagen representa el desgaste en el eje del piñón de elevación, causando deslizamientos y afectando la precisión del seguidor solar.

Figura 6.

Inclinación del paral del piranómetro



Nota: La imagen evidencia una desviación en el paral del piranómetro, comprometiendo la exactitud en la medición de la radiación solar.

2.1.5 Filtraciones en el gabinete de control

Durante el proceso de inspección del sistema, se identificó un problema crítico relacionado con la protección de los componentes electrónicos: la filtración de agua de lluvia en el gabinete de control. Esta situación representaba un riesgo significativo para la integridad del sistema, ya que la humedad y el agua acumulada dentro del gabinete podían causar cortocircuitos, corrosión en los contactos eléctricos y fallos en los módulos de control.

Se evidenció que la filtración ocurría principalmente en las uniones de la estructura del gabinete. Permitiendo la entrada de agua durante precipitaciones intensas. Para cuantificar el nivel de afectación, se realizó una inspección detallada de las conexiones eléctricas y los dispositivos dentro del gabinete, encontrando rastros de oxidación en algunos terminales y signos de deterioro en ciertas tarjetas electrónicas. También se verificó la funcionalidad de los componentes,

observando fallos intermitentes en algunos módulos debido a la exposición prolongada a la humedad.

La presencia de estas filtraciones hacía necesario implementar medidas correctivas urgentes para evitar daños mayores y garantizar la estabilidad del sistema a largo plazo. Se planteó como solución la instalación de empaques de sellado resistentes a la intemperie en todas las uniones del gabinete para mitigar el daño existente y prevenir futuras fallas.

2.1.6 Falta de protecciones en el software de control

Se encontró que el sistema de control no contaba con protecciones efectivas para evitar movimientos incontrolados, ya que, el final de carrera existente no actuaba sobre el sistema para incurrir alguna acción en él. Esto se evidencia cuando el seguidor quedó atascado en una única dirección de giro, generando un enredo y ruptura del cableado.

En la Figura 7 se observa el seguidor solar detenido en una única dirección de giro, lo que provocó la acumulación y torsión del cableado. Esta falla ocasionó enredos y posibles daños en los conductores eléctricos, comprometiendo el funcionamiento del sistema.

Figura 7.

Seguidor solar atascado debido a la falta de protecciones



Nota: La imagen representa el seguidor solar detenido en una sola dirección, causando torsión y enredos en el cableado, lo que podría afectar drásticamente su funcionamiento.

Con base en este diagnóstico, se inició un plan de acción para corregir cada una de estas deficiencias.

2.2 Implementación del hardware

2.2.1 Reemplazo del controlador L298N

Uno de los problemas más críticos detectados en el seguidor solar fue la falla recurrente del driver L298N, encargado de controlar los motores que permiten el movimiento del panel en los ejes de azimut y elevación. Durante la inspección inicial, se encontró que el driver estaba

quemado luego de realizarle pruebas, lo que impedía el funcionamiento del sistema y dejaba el seguidor sin capacidad de orientación.

Inicialmente, se sospechó que la falla del driver se debía a una sobrecarga eléctrica o una disipación térmica inadecuada. Sin embargo, tras un análisis más detallado, se identificó que la causa real del problema estaba relacionada con picos de corriente generados durante el arranque de los motores, los cuales superaban la capacidad del driver, provocando su sobrecalentamiento y posterior quema. Además, se detectó que el uso de un solo driver para ambos motores generaba una mayor carga térmica, afectando su estabilidad y reduciendo su vida útil.

Para abordar este problema, se implementaron dos estrategias clave para mejorar la confiabilidad y estabilidad del sistema:

2.2.1.1 Implementación de un arranque progresivo en los motores. Se ajustó el código de control para modificar la señal de arranque de los motores, comenzando con un 5% de potencia e incrementándola progresivamente hasta alcanzar el 100%. Con esta técnica de arranque suave, se logró reducir los picos de corriente iniciales, minimizando el estrés eléctrico en el driver y evitando su sobrecarga térmica.

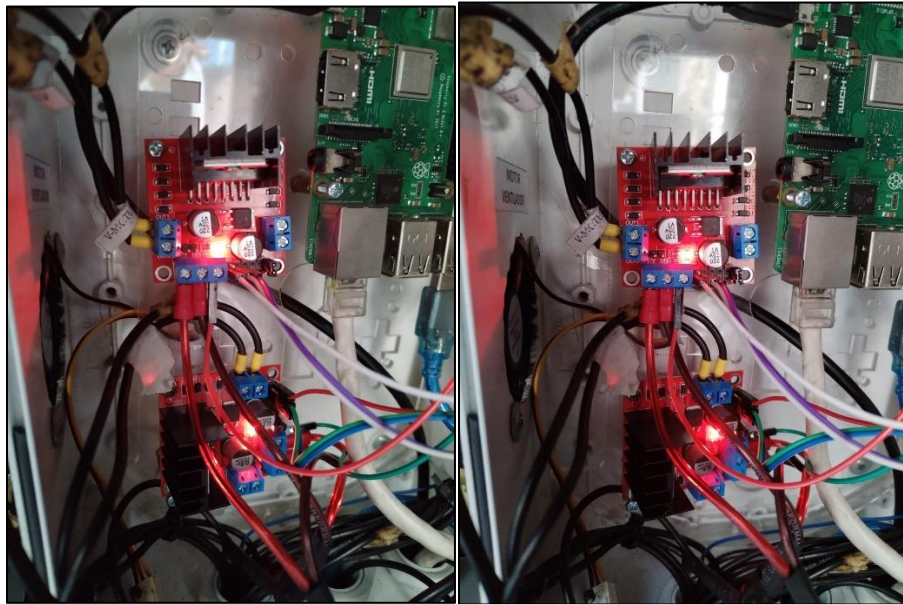
2.2.1.2 Uso de un driver L298N independiente para cada motor. Se decidió implementar un driver L298N para cada motor, en lugar de un solo controlador compartido. Esto permitió distribuir la carga eléctrica y térmica, evitando que ambos motores demandaran corriente simultáneamente de un único driver, lo que anteriormente contribuía a su fallo recurrente.

Con estas mejoras, el sistema de seguimiento solar ahora cuenta con una mayor estabilidad operativa, reduciendo el riesgo de fallos en los controladores y garantizando un funcionamiento eficiente del mecanismo de orientación del panel.

La Figura 8 muestra los drivers L298N instalados en el sistema de control del seguidor solar. Se puede observar que ahora cada motor cuenta con su propio driver independiente, lo que permite distribuir la carga de manera eficiente y minimizar el riesgo de sobrecalentamiento. Además, se han ajustado las conexiones eléctricas para garantizar una integración segura y estable con el resto del sistema.

Figura 8.

Drivers L298N instalados en el sistema y distribución independiente para cada motor.



Nota: La imagen ilustra la instalación de los drivers L298N en el sistema, destacando la implementación de un controlador por cada motor para mejorar la eficiencia y reducir fallos por sobrecarga térmica.

2.2.2 Instalación de nuevos encoder rotativos

Para mejorar la precisión del seguimiento solar en los ejes de azimut y elevación, se implementó el encoder rotativo KY-040 (20PPR) el cual era el óptimo para la implementación requerida como se puede apreciar en el Apéndice D, ya que permite determinar la posición de ambos ejes y detectar movimientos en sentido horario y antihorario. Durante el análisis del sistema, se identificó que los motores utilizados presentan un mecanismo diferencial, en el que, por cada dos giros completos del motor, el eje de azimut y elevación realiza un giro completo. Este comportamiento fue clave para calcular la cantidad de pulsos generados por el encoder y así determinar los niveles de posicionamiento del panel.

El encoder KY-040 cuenta con una resolución de 20 pulsos por revolución (PPR), lo que significa que en cada vuelta del motor se generan 20 señales de pulso. Dado que el motor debe girar dos veces para completar un giro del eje de azimut o elevación, se obtiene un total de 40 pulsos por cada movimiento completo del panel FV. Esta mejora permitió redefinir los niveles de orientación, logrando un control más preciso y estable en el seguimiento solar.

Esta mejora se implementó tanto en el movimiento de azimut como en el de elevación, permitiendo establecer una mayor cantidad de niveles de ajuste. En el eje de azimut, se definieron 40 niveles de orientación con pasos de 9° , lo que brinda una mayor sensibilidad en la alineación del panel con la trayectoria del sol. En el eje de elevación, se lograron 4 niveles con pasos de 9° , asegurando una mejor adaptación a los cambios en la inclinación solar durante el día.

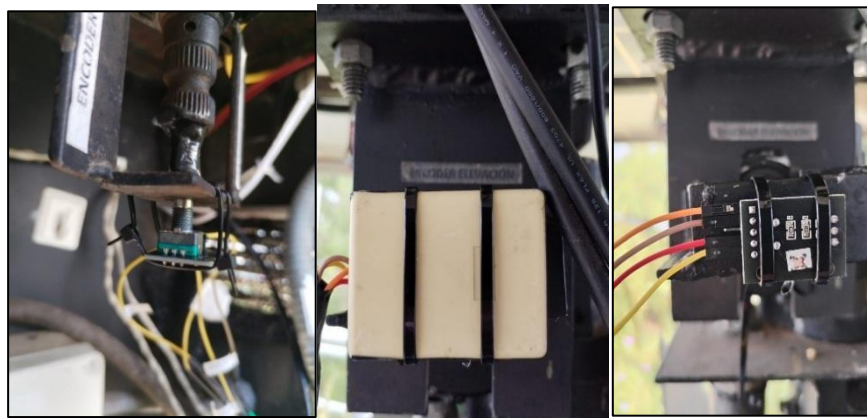
Además de mejorar la precisión, la implementación del encoder KY-040 permitió una integración sencilla con el sistema de control del seguidor solar, evitando la necesidad de sensores adicionales de mayor complejidad y costo. Con esta modificación, el sistema de seguimiento solar

logró una mejora significativa en la estabilidad del control de movimiento, mejorando su eficiencia en la captación de energía y asegurando una mayor confiabilidad en su funcionamiento a largo plazo.

La Figura 9 muestra el encoder rotativo KY-040 implementado en el sistema de seguimiento solar. Se observa su instalación en los ejes de azimut y elevación, asegurando su correcta fijación y alineación con el mecanismo de movimiento.

Figura 9.

Encoder rotativo KY-040 y su instalación en el seguidor solar



Nota: Las imágenes representan, de izquierda a derecha, el encoder rotativo KY 040 y su proceso de instalación en el seguidor solar, incluyendo la protección contra la lluvia para garantizar su durabilidad.

Tabla 1.

Características del encoder rotativo KY-040

Parámetro	Especificación
Modelo	KY-040
Tipo de sensor	Encoder rotativo incremental

Parámetro	Especificación
Resolución	20 pulsos por Revolución (PPR)
Voltaje de operación	3.3V – 5V DC
Consumo de corriente	≤ 10 mA
Tipo de salida	Digital (señales A y B en cuadratura)
Método de detección	Interrupción mecánica con discos de contacto
Número de pasos	40 pasos en azimut, 5 pasos en elevación
Paso por nivel	9° por cada nivel de movimiento
Compatibilidad	Microcontroladores, Arduino, Raspberry Pi
Dimensiones	30mm x 18mm x 15mm

¿Por qué se utilizó este sensor en el proyecto?

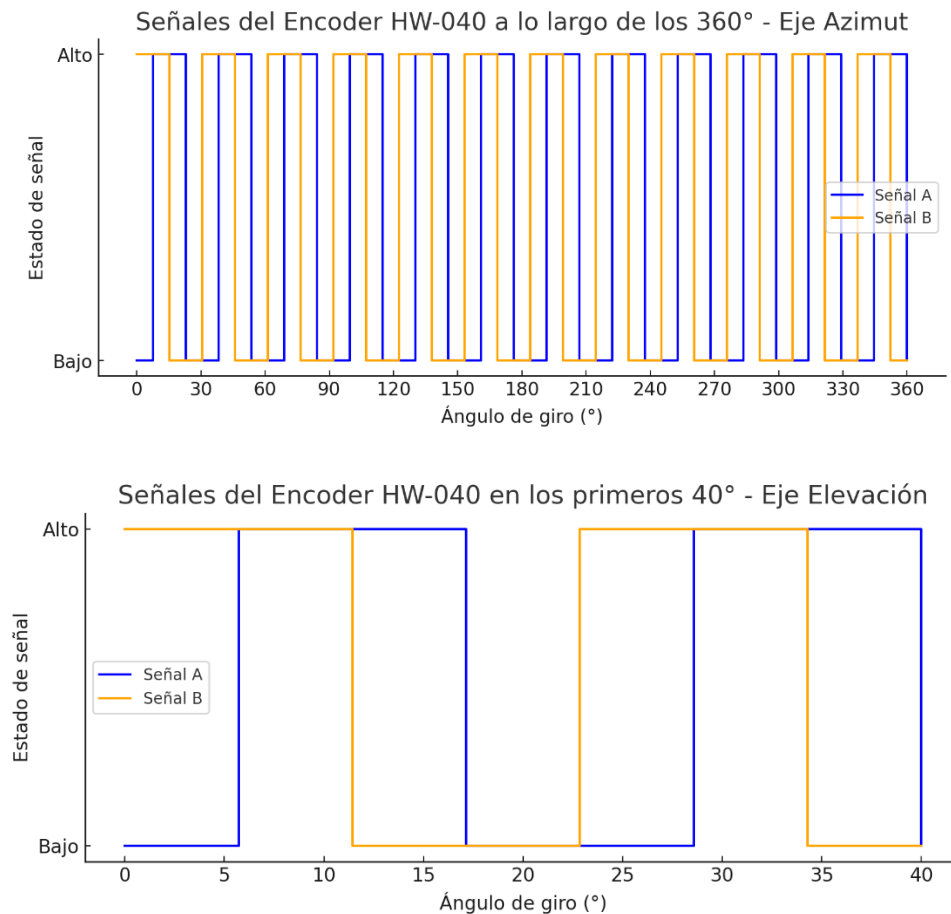
Se implementó el encoder KY-040 en los ejes de azimut y elevación debido a su capacidad de generar 40 pulsos por ciclo de movimiento del panel, permitiendo definir 40 niveles en azimut y 4 en elevación con pasos de 9°. Su integración sencilla con el sistema de control y su bajo consumo lo hicieron ideal para mejorar la precisión del seguimiento solar sin aumentar la complejidad del hardware.

Nota: La tabla presenta las especificaciones técnicas del encoder KY-040, seleccionado para el seguidor solar en el eje de elevación.

La Figura 10 muestra las señales A y B generadas por el encoder rotativo HW-040 lo largo de los 360° evidenciando los 12 niveles iniciales, posteriormente de manera ampliada, los primeros 40° de giro. Se observa que en los primeros 30°, el encoder solo alcanza a generar 2 pulsos, lo que limita la precisión del seguimiento. Estas señales indican el sentido de giro: si A cambia antes que B, el movimiento es en sentido horario (CW); si B cambia antes que A, el movimiento es en sentido antihorario (CCW).

Figura 10.

Señales del encoder HW-040 inicialmente instalado para ambos ejes.



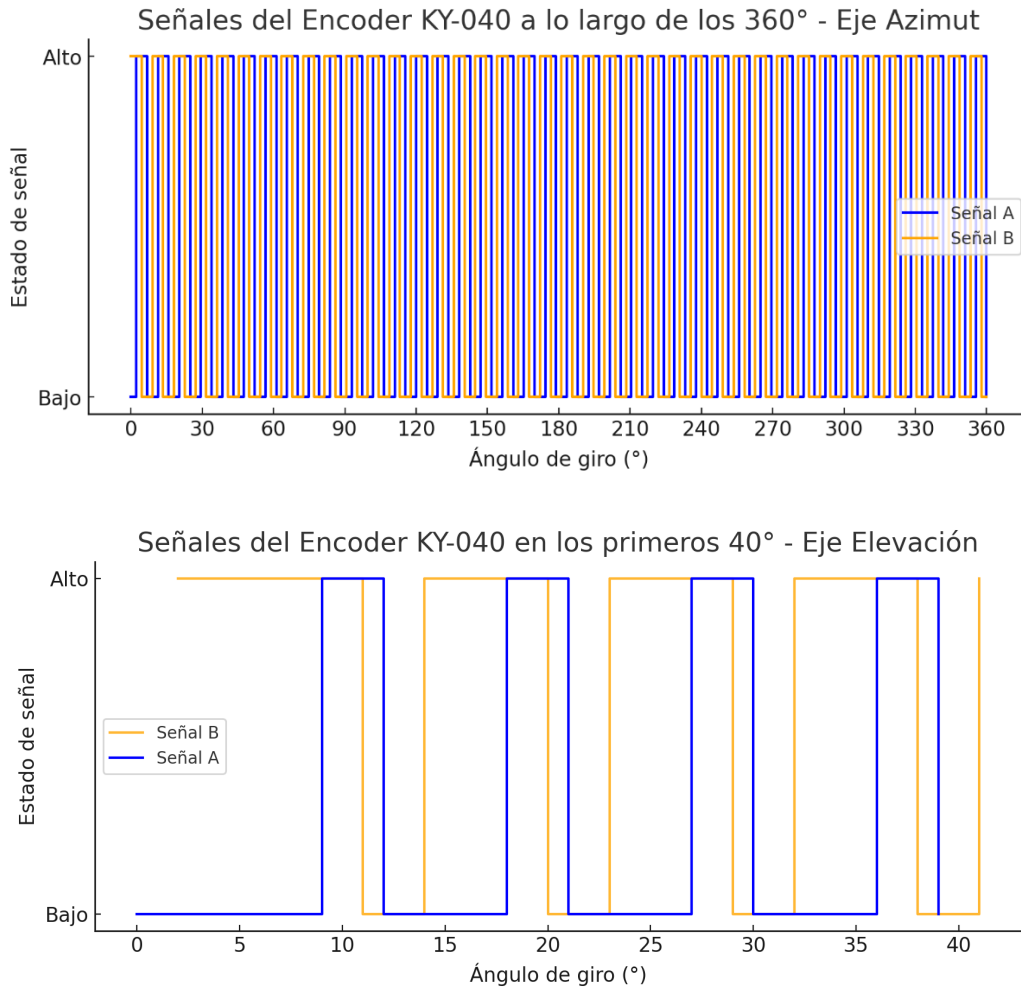
Nota: La Figura representa las señales A y B del encoder HW-040 en los 360° en el eje azimut y luego dentro de los primeros 40° en el eje elevación de arriba hacia abajo respectivamente, donde en los primeros 30° se observa que solo se generan 2 pulsos, limitando la precisión del seguimiento.

La Figura 11 muestra las señales A y B generadas por el encoder KY-040 a lo largo de los 360° y, de manera ampliada, dentro de los primeros 40° de giro. Se observa que en los primeros 30°, el número de pulsos generados es significativamente mayor en comparación con el encoder

KY-040, lo que permite una mayor precisión en la detección de posición y un mejor control del seguimiento solar.

Figura 11.

Señales del encoder KY-040 y su mejora en la precisión.



Nota: La Figura representa, la imagen de arriba las señales A y B del encoder KY-040, donde en los 360° se observan los 40 niveles del eje azimut y abajo los 40° iniciales donde se observan los 5 niveles del eje de elevación.

2.2.3 Recableado del sistema

El seguidor solar presentaba fallas en la transmisión de señales debido al deterioro del cableado existente. Se identificaron cables con aislamiento dañado, conexiones deficientes y oxidación en los terminales, lo que afectaba la comunicación con los encoder, las PT100, piranómetros y demás sensores del sistema, así como actuadores y el sistema de control. Para corregir estas deficiencias, se llevó a cabo un recableado completo del sistema, garantizando una transmisión de los datos de manera eficiente y reduciendo la probabilidad de interferencias.

Inicialmente, se realizaron actividades de inspección y diagnóstico del cableado para evaluar el estado de los conductores eléctricos existentes, identificando secciones con desgaste, cortes o problemas de aislamiento. Posteriormente, se procedió con la sustitución de cables obsoletos, reemplazando aquellos con aislamiento deteriorado y conductores corroídos por nuevos cables con mejor protección contra la intemperie y mayor resistencia a variaciones de temperatura. Además, se redistribuyó el cableado desde el tablero de control hasta los sensores y actuadores, asegurando una instalación más ordenada, minimizando cruces innecesarios y facilitando futuras inspecciones. Por último, se realizaron pruebas de continuidad y funcionamiento con un multímetro digital para verificar la correcta transmisión de señales y la adecuada alimentación eléctrica en cada componente del sistema.

La Figura 12 muestra distintas etapas del proceso de recableado, desde la inspección hasta la instalación de nuevos cables y su correcta distribución. Se observa la reorganización del cableado para mejorar la conexión entre el tablero de control, sensores y actuadores, asegurando una mejor protección y funcionamiento del sistema.

Figura 12.

Proceso de recableado del seguidor solar



Nota: Las imágenes representan de izquierda a derecha, el estado inicial del cableado y el proceso de sustitución y reorganización para mejorar las conexiones del sistema.

2.2.4 Instalación y reparación de la UPS

Para asegurar la estabilidad del suministro eléctrico en el seguidor solar, se llevó a cabo la instalación y reparación de la UPS, un componente clave para proteger los dispositivos electrónicos ante fluctuaciones de voltaje y cortes de energía imprevistos. Durante el diagnóstico inicial, se identificó una falla en la UPS causada por una batería defectuosa, por lo que se procedió a su sustitución por una nueva, con especificaciones adecuadas para satisfacer los requerimientos del sistema.

Esta intervención permitió restablecer un suministro de energía continuo y confiable, evitando interrupciones que pudieran afectar el funcionamiento del seguidor solar. Además, se

mejoró la capacidad de respuesta del sistema ante variaciones en la red eléctrica, garantizando una mayor protección y estabilidad operativa.

La Figura 13 muestra la nueva batería adquirida y el proceso de instalación de la UPS. Se observa la correcta conexión de los terminales y la integración del sistema para garantizar un suministro eléctrico estable y continuo, evitando interrupciones en el funcionamiento del seguidor solar.

Figura 13.

Reemplazo de la batería y reinstalación de la UPS



Nota: Las imágenes representan la nueva batería y la instalación de la UPS, garantizando un suministro eléctrico estable.

2.2.5 Refuerzo del eje del piñón de elevación

Para eliminar los deslizamientos del piñón en la elevación del seguidor solar, se llevó a cabo un proceso de ajuste y refuerzo del eje del piñón de elevación. Para ello, fue necesario

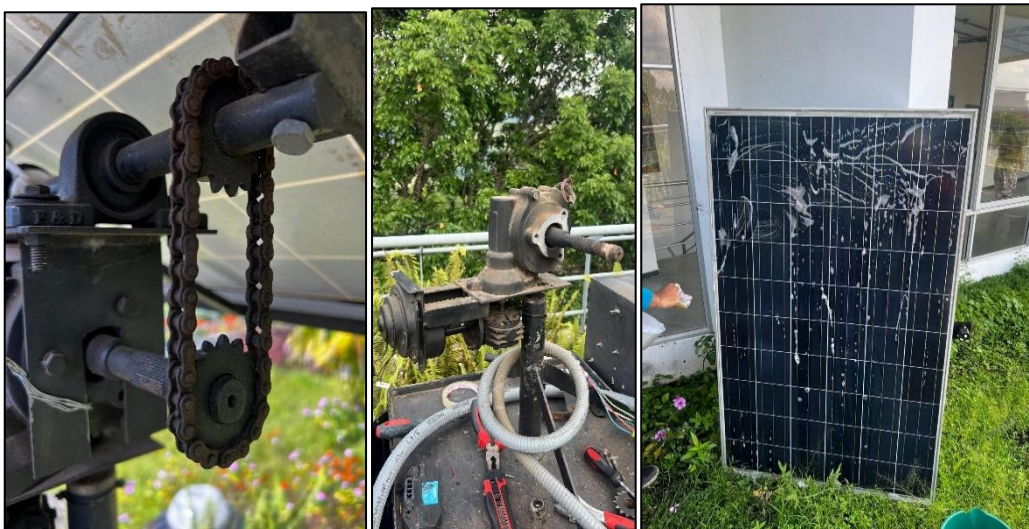
desmontar completamente el panel junto con el motor, permitiendo un acceso adecuado a los componentes mecánicos involucrados.

Durante esta intervención, se realizaron ajustes en la fijación del piñón, asegurando un acoplamiento firme y reduciendo el juego mecánico que generaba imprecisiones en el movimiento. Además, se aprovechó la oportunidad para llevar a cabo un mantenimiento general del sistema, incluyendo la limpieza del panel, la lubricación de la cadena y los piñones, garantizando así un funcionamiento más eficiente y prolongando la vida útil de los componentes.

La Figura 14 muestra el proceso de desmontaje total del panel solar para extraer y reparar el eje del piñón de elevación. Además, se realizó mantenimiento general, incluyendo limpieza del panel y lubricación de la cadena y piñones, asegurando un funcionamiento óptimo y prolongando la vida útil del sistema.

Figura 14.

Desmontaje del panel para reparación del eje y mantenimiento general.



Nota: Las imágenes representan, de izquierda a derecha, el proceso de desmontaje del panel para la extracción y reparación del eje, junto con el mantenimiento general de limpieza y lubricación.

2.2.6 Sellado del gabinete de control

Para prevenir las filtraciones de agua y garantizar la protección de los componentes electrónicos, se llevó a cabo la instalación de empaques sellados en los gabinetes del sistema. Se aplicaron sellos tanto en el gabinete de control, donde se encuentran los módulos de procesamiento y gestión del seguidor solar, como en el gabinete de potencia, encargado de la distribución de energía y protección eléctrica del sistema.

Esta medida fue implementada tras identificar posibles filtraciones que podrían comprometer la operatividad de los circuitos y causar fallas en los dispositivos internos. Con el sellado adecuado, se minimiza el riesgo de humedad y corrosión, asegurando un ambiente más seguro para los componentes electrónicos y prolongando su vida útil.

La Figura 15 muestra el proceso de instalación de los sellos en el gabinete de control. En la imagen se observa la aplicación de los empaques de sellado en las uniones y accesos de cableado, asegurando una protección efectiva contra filtraciones de agua.

Figura 15.

Instalación de sellos en el gabinete de control



Nota: Las imágenes ilustran la implementación de la solución para evitar filtraciones, protegiendo los componentes electrónicos de la humedad y garantizando un funcionamiento óptimo del sistema.

2.3 Mejora del software de control

2.3.1 Calibración de los encoder

Para garantizar un seguimiento solar preciso, se realizó un proceso de calibración y ajuste en la programación del sistema para los nuevos encoders rotativos utilizados en los ejes de azimut y elevación. Esta calibración permitió mejora en la orientación del panel y mejorar la respuesta del sistema ante los cambios en la posición solar.

En el caso del encoder de azimut, se establecieron 40 niveles de ajuste, con pasos de 9° , lo que proporciona una mayor precisión en la alineación horizontal del panel con la trayectoria del

sol. Para esto se realizaron pruebas utilizando una brújula, con el fin de verificar y ajustar la orientación del seguidor solar en función de los puntos cardinales. Asimismo, se configuraron 4 niveles para el eje de elevación con pasos de 9° , asegurando una inclinación óptima del panel en función del ángulo de incidencia de la radiación solar.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de estabilidad para verificar que los encoders generaran señales consistentes y libres de interferencias. Se evaluó la respuesta del sistema ante cambios bruscos en la dirección de movimiento, asegurando así una operación más confiable.

Como parte del proceso de calibración, se llevó a cabo la medición de los ángulos permisibles para evitar colisiones del panel con el gabinete. Para esto, se utilizó una aplicación de medición de inclinación, con la cual se determinó que el rango seguro de inclinación es de aproximadamente 36° , permitiendo que el panel se mueva sin obstrucciones ni riesgos de daño estructural.

La Figura 16 muestra el proceso de calibración de los encoder, donde se utilizó una aplicación de medición de inclinación para determinar el rango seguro de movimiento en elevación y una brújula para validar la orientación en azimut. Estas pruebas permitieron establecer límites óptimos en la programación y mejorar la precisión del seguimiento solar.

Figura 16.

Pruebas de calibración de los encoder con medición de inclinación y brújula



Nota: La imagen ilustra las pruebas realizadas para determinar los ángulos permisibles de inclinación y la orientación en azimut, garantizando un control preciso y seguro del movimiento del panel.

2.3.2 Ajuste y mejora de la programación del sistema

Con el objetivo de mejorar la eficiencia y seguridad del seguidor solar, se realizaron ajustes y mejoras en la programación del sistema, tanto en la gestión de movimiento como en la integración de sensores para la adquisición de datos.

2.3.2.1 Implementación de protecciones de movimiento. Para evitar que el seguidor solar girara de manera indefinida y prevenir daños en el cableado y en los motores, se incorporaron rutinas de seguridad en el código de control. Inicialmente, el sistema contaba con un final de carrera como mecanismo de protección, pero tras análisis se detectó que este no operaba

correctamente, ya que al activarse no generaba la respuesta esperada en el control del sistema. Debido a esta limitación, se optó por eliminar el final de carrera y reemplazarlo por restricciones programadas en la lógica de control del seguidor. De esta manera se establecieron límites específicos para ambos ejes del seguidor solar:

- Eje de azimut: Si el panel FV supera el nivel 39, automáticamente retorna a su posición inicial, evitando movimientos que puedan comprometer la estabilidad del sistema.
- Eje de elevación: Si el panel FV se sale del rango de la posición 0 a 3, se regresa a la posición 0, asegurando que el movimiento permanezca dentro de un rango seguro.

Estas modificaciones permitieron un control más preciso y seguro del sistema, eliminando la dependencia de sensores mecánicos poco confiables y previniendo fallos estructurales causados por movimientos incontrolados.

2.3.2.2 Ajuste de la programación en la Raspberry Pi 3 B+. Además de las mejoras en la gestión del movimiento, se realizó un ajuste profundo y mejora del código en la Raspberry Pi 3 B+, enfocada en mejorar la estructura del programa y la integración eficiente de los sensores ambientales como las PT100 y los piranómetros. Se reorganizó el código para hacerlo más modular y estructurado, implementando clases y métodos que permitieron una mejor gestión de las lecturas de sensores y del control de movimiento.

Asimismo, se mejoró la comunicación con los encoders, eliminando la dependencia de hilos y mejorando la estabilidad del sistema al utilizar una estructura de procesamiento más eficiente. Se implementaron condiciones de seguridad en el código para evitar reinicios abruptos de valores de encoders y garantizar transiciones más suaves en los movimientos del seguidor solar.

Adicionalmente, se mejoró la configuración de los pines GPIO, asegurando una inicialización más eficiente y evitando redundancias en la ejecución del programa.

Estos cambios lograron un sistema más eficiente, estable y con menor carga de procesamiento, asegurando un monitoreo confiable y una respuesta adecuada del seguidor solar a las variaciones de posición y condiciones ambientales.

La Tabla 2 presenta una comparación entre la versión inicial del código del seguidor solar y la versión mejorada. Se pueden observar mejoras en la estructura del código, manejo de encoders, persistencia de datos y control de motores, reflejando una mejora significativa en la gestión del sistema.

Tabla 2.

Comparación entre la Programación Anterior y la Mejorada

Aspecto	Versión Inicial	Versión Mejorada
Estructura del código	Código lineal con múltiples hilos y dependencias.	Código modular basado en clases y métodos organizados.
Conexión Encoders	Clk1 pin 13 Dt1 pin 11 (primer encoder) Clk2 pin=15 Dt2 pin=16 (segundo encoder)	Clk pin 13 D pin 11 (elevacion) Clk pin=33 Dt pin=35 (Azimut)
Lectura de encoders	Lectura dispersa y uso de funciones globales.	Encapsulada en EncoderReader
Control de motores	Directo en el bucle principal	Encapsulado en MotorController
Persistencia de datos	Escrituras manuales en archivos. (abrir/escribir/archivo)	Clase DataPeristence
Cálculo de ángulos	Procesamiento dentro del bucle principal, generando retardos.	Cálculo Mejorado con una clase dedicada. Clase AngleCalculator
Configuración de GPIO	Inicialización repetitiva de pines en distintas partes del código.	Configuración centralizada al inicio del programa.

Aspecto	Versión Inicial	Versión Mejorada
Uso de hilos	Dependencia de múltiples hilos en la lectura de encoders.	No utiliza
Condiciones Especiales	Reinicio abrupto de valores de encoders fuera de rango.	Retoma la posición 0 si sobrepasa los límites de su movimiento

Nota: La tabla resume las principales mejoras implementadas en la programación del seguidor solar, reflejando mejoras en la estructura del código, manejo de sensores y eficiencia del sistema.

3. Resultados obtenidos

Este capítulo expone los resultados alcanzados tras la implementación de las mejoras en el seguidor solar. A través de evidencias demostrativas y comparativas, se detallan los avances logrados en la precisión del seguimiento, la estabilidad del sistema y la eficiencia operativa.

3.1 Mejoras del movimiento en azimut y elevación

Uno de los principales logros fue el incremento en la cantidad de niveles de orientación en ambos ejes. Inicialmente, el seguidor solar contaba con doce niveles en azimut y tres niveles en elevación, lo que limitaba la precisión del seguimiento. Esta baja resolución provocaba pérdidas en la captación de energía solar, ya que el panel no podía alinearse correctamente con la trayectoria del sol a lo largo del día.

Tras la calibración y la implementación del nuevo sistema de encoders, se logró aumentar a 40 niveles en azimut (con pasos de 9°) y 4 niveles en elevación (con pasos de 9°). Este incremento

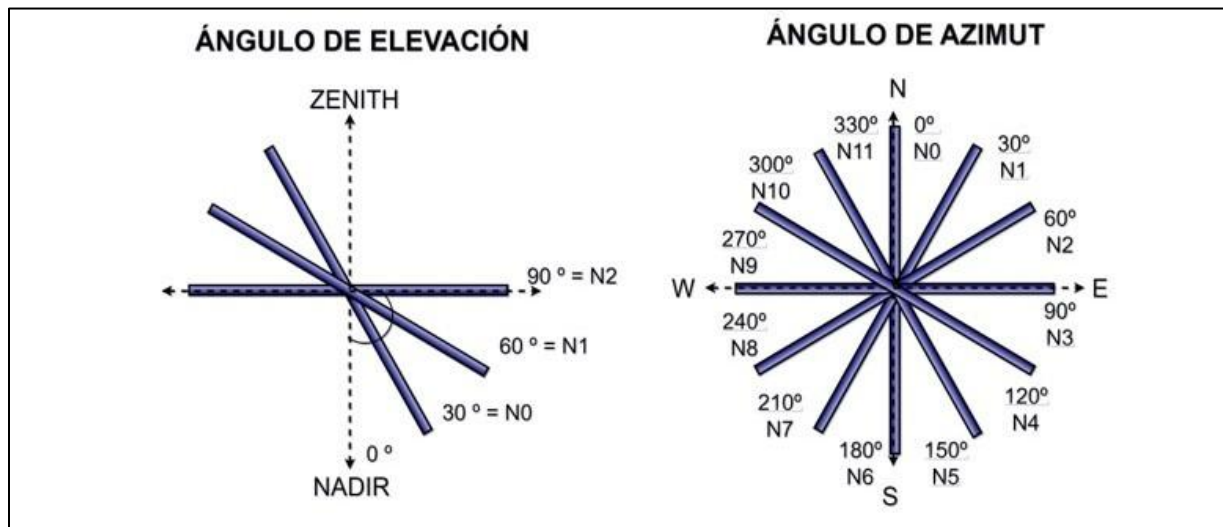
permitió un ajuste mucho más preciso de la orientación del panel FV, asegurando que este se mantuviera en una posición que mejora la captación de irradiancia solar.

Las pruebas realizadas demostraron que este cambio generó una mejora en la alineación del seguidor con el sol, reduciendo los errores de posicionamiento. La comparación entre la distribución de niveles antes y después de la mejora se muestra en los siguientes esquemas.

La Figura 17 ilustra la distribución inicial de los niveles de orientación en azimut y elevación, mientras que la Figura 18 muestra la nueva distribución después de las mejoras implementadas.

Figura 17.

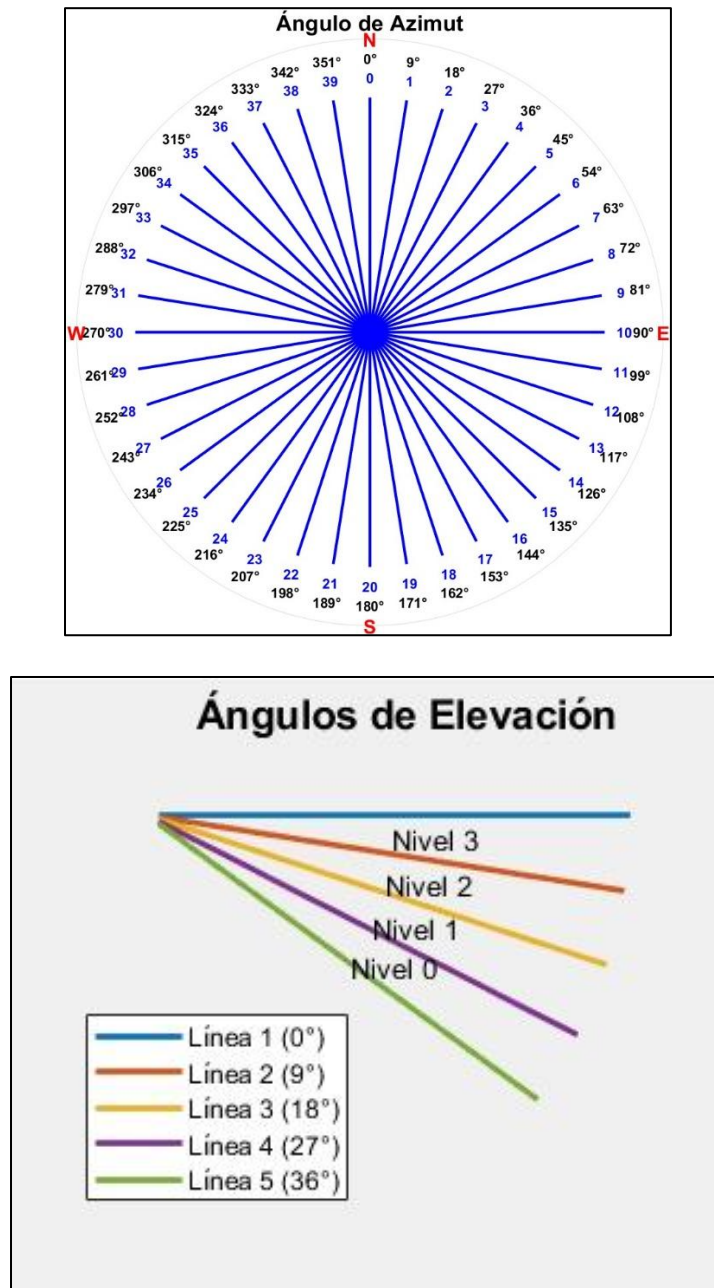
Esquema de los niveles de azimut y elevación antes de la mejora.



Nota. Tomada de: Trabajo de grado anterior.

Figura 18.

Esquema de los niveles de azimut y elevación después de la mejora.



Nota: La comparación entre ambas figuras evidencia el aumento en la cantidad de niveles, lo que permite un seguimiento solar más preciso y eficiente.

3.2 Seguimiento Solar Mejorado

Para evaluar el impacto de las mejoras en el seguimiento solar, se realizaron pruebas en diferentes momentos del día, comparando el comportamiento del sistema antes y después de la implementación de los nuevos encoders y ajustes en la programación.

Las mediciones realizadas indicaron que, en la configuración original, el panel presentaba desviaciones significativas con respecto a la trayectoria solar, lo que generaba una menor captación de energía. Después de la implementación de los nuevos niveles de ajuste, se observó que el panel lograba una mejor alineación, reduciendo los ángulos de error y maximizando la exposición a la radiación solar.

Además, se analizaron las variaciones en la potencia generada por el sistema antes y después de la mejora, confirmando que las mejoras implementadas tuvieron un impacto positivo en la eficiencia energética del seguidor solar.

La Figura 19 muestra el seguimiento solar realizado en diferentes momentos del día. En la columna izquierda, se observan capturas tomadas desde la perspectiva del panel, evidenciando la alineación con la trayectoria del sol. En la columna derecha, se presentan las imágenes de la posición del seguidor solar en cada instante, verificando la correspondencia entre el ajuste del panel y la ubicación solar.

Figura 19.

Registro del seguimiento solar en distintos horarios del día.





Nota: Las imágenes ilustran la capacidad del sistema para orientar el panel de manera precisa en función de la posición del sol, mejorando la captación de energía.

3.3 Estabilidad y protección del sistema

Otro de los resultados obtenidos fue la implementación de mejoras físicas y protecciones en el software para evitar fallas en los movimientos del seguidor solar. Antes de estas modificaciones, el sistema no contaba con restricciones adecuadas para limitar el movimiento de

los motores, lo que ocasionaba desplazamientos fuera de los rangos permitidos. Esto podía generar bloqueos mecánicos y daños en el cableado debido a enredos provocados por giros excesivos del panel FV.

3.3.1 Mejoras Físicas Implementadas

Refuerzo en la estructura mecánica: Se ajustaron los anclajes del seguidor solar para garantizar una mayor estabilidad estructural.

Reparación del eje del piñón de elevación: Se corrigieron los deslizamientos detectados en la transmisión de movimiento.

Sellado del gabinete de control: Se instalaron empaques para evitar filtraciones de agua que pudieran comprometer la electrónica.

Rediseño del cableado: Se reorganizaron las conexiones eléctricas para reducir interferencias y mejorar la distribución de energía.

3.3.2 Implementación de Protecciones en el Código

Protección en el eje de elevación: Se estableció un rango de movimiento seguro entre 0° y 36° , evitando que el panel choque con el gabinete. Además, se programó una condición en la que, si el panel supera la posición 3 o cae por debajo de 0, se regresa inmediatamente a la posición 0.

Protección en el eje de azimut: Se limitó el movimiento a un máximo de 39 niveles. Si el panel alcanza este límite, automáticamente regresa a la posición 0 para evitar enredos y daños en el cableado por giros continuos en la misma dirección.

4. Conclusiones

Este capítulo expone una evaluación crítica de los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, contrastándolos con los objetivos planteados inicialmente. Se analizan patrones emergentes, implicaciones técnicas y lecciones aprendidas que pueden contribuir a futuras mejoras en el seguimiento solar y sistemas de generación fotovoltaica.

4.1 Evaluación de los Objetivos Iniciales

El principal objetivo del proyecto consistía en mejorar la operación del seguidor solar de dos ejes, mejorando su precisión y estabilidad mediante la actualización de hardware y software. Los resultados obtenidos demuestran que se lograron avances significativos en este aspecto, al incrementar la cantidad de niveles de orientación, mejorar la captación de radiación solar y reforzar la protección del sistema ante fallas operativas.

La mejora del seguimiento solar permitió alcanzar una mayor eficiencia en la alineación del panel con la trayectoria del sol, lo que se tradujo en un mejor aprovechamiento de la energía disponible. Asimismo, la implementación de protecciones en el software y mejoras en la infraestructura mecánica incrementaron la estabilidad y confiabilidad del sistema.

4.2 Patrones y tendencias identificadas

A partir del análisis de datos y pruebas realizadas, se identificaron varios patrones clave. La precisión en el seguimiento solar mejoró significativamente con el incremento en los niveles de orientación en los ejes de azimut y elevación. Además, la implementación de restricciones en la programación del sistema permitió evitar daños en el cableado y prevenir fallos mecánicos. También se observó que la estabilidad del sistema depende en gran medida de un diseño estructural robusto y la integración de protecciones contra condiciones ambientales adversas. Finalmente, la correcta calibración de las posiciones cero en los ejes garantizó que el panel FV iniciara sus movimientos desde un punto de referencia confiable, minimizando errores acumulativos en la orientación.

Estos hallazgos respaldan la efectividad de las modificaciones implementadas y sugieren que la mejora del sistema de control es un factor determinante para el desempeño del seguidor solar.

4.3 Restricciones y desafíos identificados

Durante el desarrollo del proyecto, se presentaron algunas restricciones que influyeron en la ejecución de las mejoras propuestas. Uno de los principales desafíos fue la discrepancia entre los diagramas de conexiones y cableado disponibles y la instalación real del sistema, lo que dificultó la identificación y configuración de algunos módulos. Además, algunos componentes representados en los esquemas previos no coincidían con los dispositivos instalados, lo que requirió un proceso detallado de revisión y corrección.

Asimismo, se presentaron limitaciones en la estructura física del seguidor solar, impidiendo la implementación de ángulos de inclinación mayores sin riesgo de colisión con el gabinete de control. A pesar de estos desafíos, las soluciones implementadas lograron superar los principales inconvenientes y permitieron mejorar el desempeño del seguidor solar dentro de los límites operativos del sistema.

4.4 Impacto y contribución del proyecto

Los resultados obtenidos en este proyecto ofrecen contribuciones relevantes en el ámbito del seguimiento solar. Se demostró que la actualización de encoders y la reestructuración del sistema de control pueden mejorar significativamente la precisión del seguimiento solar. Además, la implementación de estrategias de protección en la programación previene daños mecánicos y eléctricos, aumentando la vida útil del sistema. También se generaron procedimientos de calibración y mantenimiento que pueden servir como referencia para futuros desarrollos en sistemas de seguimiento solar de dos ejes.

Este proyecto proporciona una base para futuras investigaciones en el área de control de seguidores solares, permitiendo explorar nuevas metodologías basadas en inteligencia artificial o aprendizaje automático para mejorar aún más la eficiencia del sistema.

5. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se sugieren futuras líneas de trabajo que permitan mejorar aún más el desempeño del seguidor solar y explorar nuevas mejoras tecnológicas.

1. Implementación de algoritmos avanzados: Se recomienda la integración de modelos predictivos basados en inteligencia artificial para mejorar la precisión del seguimiento solar.
2. Mejoramiento del almacenamiento energético: Incorporar un sistema de baterías que garantice la autonomía del seguidor solar ante interrupciones en el suministro eléctrico.
3. Monitoreo y control remoto: Desarrollar una plataforma de supervisión en tiempo real para analizar el comportamiento del sistema y detectar fallas de manera oportuna.
4. Mejoras en la estructura mecánica: Evaluar materiales más resistentes y ligeros que reduzcan el desgaste del sistema y mejoren su estabilidad a largo plazo.
5. Validación en diferentes condiciones climáticas: Ampliar las pruebas del seguidor solar en distintos entornos para evaluar su rendimiento y adaptabilidad ante variaciones ambientales.

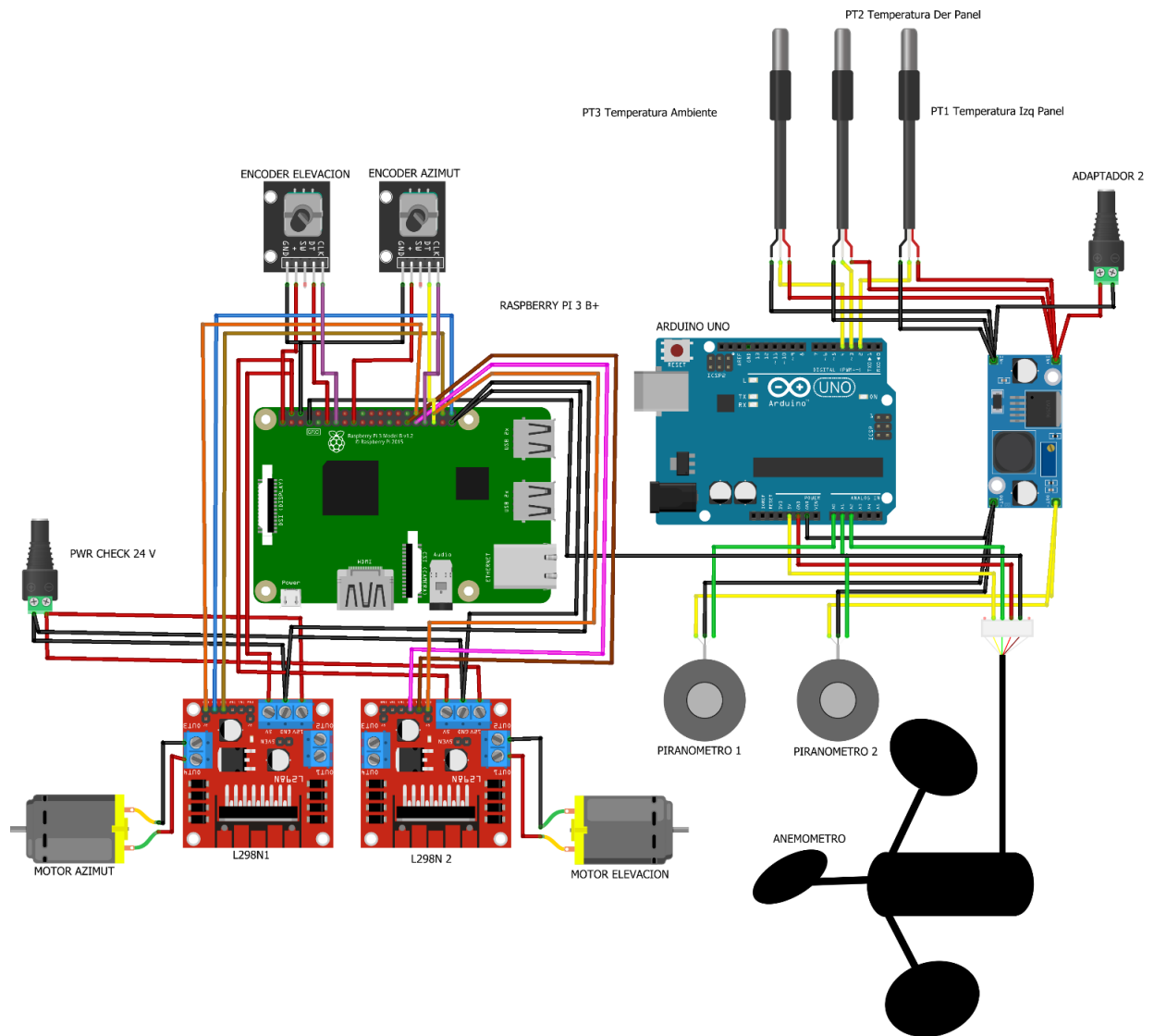
Estas recomendaciones buscan proporcionar un punto de partida para futuras investigaciones y desarrollos que contribuyan al avance en la tecnología de seguimiento solar.

Referencias

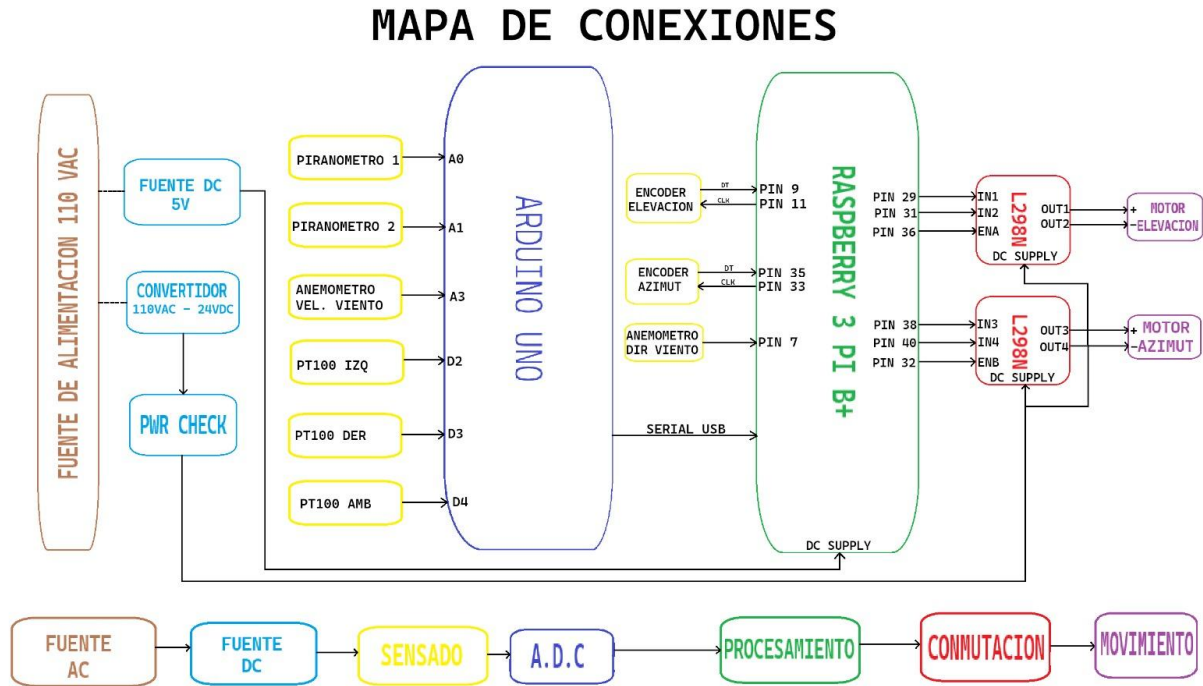
- Gorky, M. (2023) *Microclimaticas: PT100 – Temperatura* [Repositorio de código]. GitHub. <https://github.com/mrgorkyy/microclimaticas/blob/3e77ff263f0f3d1584f6fca46e2b5cb8599b6921/PT100%20-%20Temperatura>
- Gorky, M. (2023). *Microclimaticas: Veleta* [Repositorio de código]. GitHub. <https://github.com/mrgorkyy/microclimaticas/blob/main/veleta>
- PVLib (2023). *PVLib: Solar Position and Photovoltaic System Performance*. <https://pvlib-python.readthedocs.io/>
- Raspberry Pi Foundation (2023). *Raspberry Pi GPIO Documentation*. <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/gpio/>
- RPi.GPIO Library (2023). *RPi.GPIO Documentation*. <https://pypi.org/project/RPi.GPIO/>

Apéndices

Apéndice A. Esquemático de conexiones físicas del seguidor solar



Apéndice B. Mapa de conexiones del sistema de seguimiento solar



Apéndice C. Plan de Futuras Intervenciones

Este plan detalla mejoras futuras enfocadas en la autonomía, resistencia y eficiencia del seguidor solar, permitiendo mejorar su desempeño y prolongar su vida útil.

Fase	Acciones Propuestas	Objetivo	Tiempo Estimado
<i>1. Implementación de un Sistema de Mantenimiento Predictivo</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Integrar un sistema de monitoreo de fallos basado en análisis de datos históricos. -Implementar registros automáticos de desempeño para identificar patrones de desgaste en motores, sensores y electrónica -Utilizar algoritmos de detección temprana de fallos para anticipar posibles averías y planificar mantenimientos preventivos. 	Prevenir fallos inesperados y mejorar la confiabilidad del sistema mediante mantenimiento programado basado en datos reales.	3 meses
<i>2. Mejora en la Resistencia Estructural</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Evaluar el impacto del viento y la lluvia en la estructura y reforzar la fijación de los componentes mecánicos. -Aplicar recubrimientos anticorrosivos en elementos metálicos expuestos a la intemperie. 	Proteger el sistema ante factores ambientales y aumentar su durabilidad operativa.	4 meses
<i>3. Implementación de un Sistema de Almacenamiento Energético Autónomo</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Diseñar un sistema de almacenamiento con baterías para asegurar operatividad en ausencia de suministro eléctrico. -Evaluar la integración de paneles fotovoltaicos adicionales para alimentar el sistema de control. -Implementar un sistema de gestión inteligente de carga y descarga de baterías. 	Reducir la dependencia de la red eléctrica y garantizar autonomía operativa.	5 meses
<i>4. Ajuste del Algoritmo de</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Explorar el uso de inteligencia artificial o machine learning para 	Mejorar la captación de energía con un sistema	6 meses

Fase	Acciones Propuestas	Objetivo	Tiempo Estimado
<i>Seguimiento Solar</i>	<p>mejorar la predicción de la trayectoria solar.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Implementar un modelo híbrido de seguimiento que combine sensores con cálculos astronómicos. -Ajustar la respuesta del seguidor ante cambios bruscos en la radiación para evitar movimientos innecesarios. 	de seguimiento más eficiente y adaptable.	
<i>5. Documentación Avanzada y Capacitación</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Desarrollar manuales técnicos con esquemas eléctricos, mecánicos y protocolos de calibración. -Crear un programa de capacitación para futuros operadores del sistema. -Generar reportes automatizados de rendimiento para facilitar decisiones en futuras mejoras. 	Garantizar la continuidad y sostenibilidad del proyecto mediante documentación y capacitación estructurada.	2 meses

Apéndice D. Comparativa de Encoders y Sensor de Velocidad

Característica	HW-040	KY-040	Sensor de Velocidad F249
Tipo de sensor	Encoder rotatorio	Encoder rotatorio	Sensor de efecto Hall
Resolución	Baja	Media	Alta
Detección de dirección	Sí	Sí	No
Voltaje de operación	3,3 V – 5 V	3,3 V – 5 V	5 V – 24 V
Salida de señales	Pulsos digitales (A/B)	Pulsos digitales (A/B)	Pulsos digitales
Número de canales	2 (A/B)	2 (A/B)	1
Frecuencia de operación	10 - 20 kHz	10 - 20 kHz	Hasta 100 kHz
Consumo de corriente	5 - 10 mA	5 - 10 mA	10 - 20 mA
Método de detección	Optoelectrónico	Optoelectrónico	Magnético (efecto Hall)
Durabilidad mecánica	Media	Media	Alta (sin contacto mecánico)
Rango de velocidad	10 - 100 RPM	10 - 100 RPM	100 - 5000 RPM
Aplicaciones típicas	Control de ejes, interfaces giratorias	Seguimiento solar, control de motores	Tacómetros, medición de velocidad
Adaptabilidad a seguidor solar	Adecuado	Óptimo	No adecuado

Apéndice E Video Explicativo del uso general de los archivos

<https://drive.google.com/file/d/1hYLnXyHsrH7KMjs3DlbMEgBVixz69iQ/view?usp=sharing>

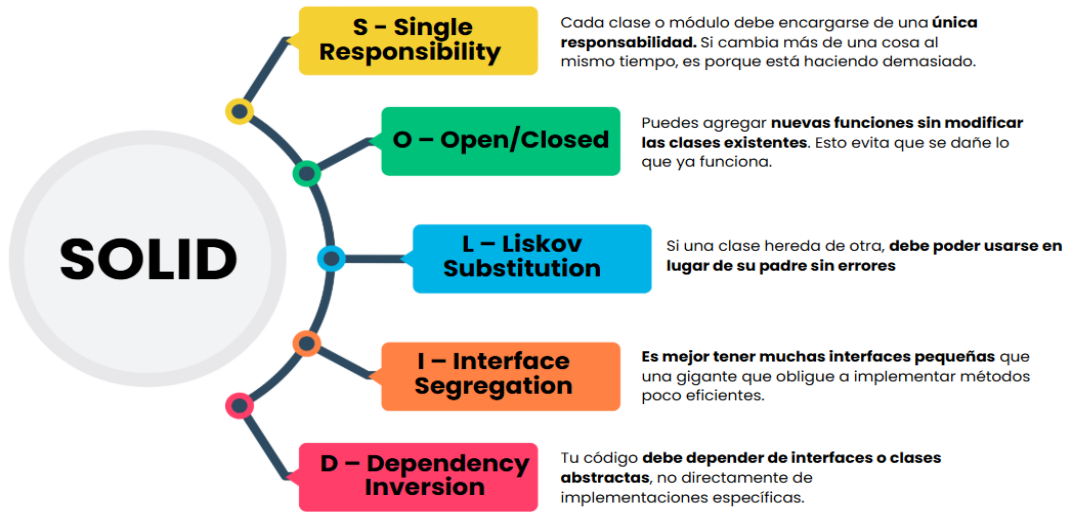
Apéndice F Video sobre como realizar la calibración del sistema

https://drive.google.com/file/d/1aFavdWGIED2K_hOWGjy86LfYbGqnD9_r/view?usp=sharing

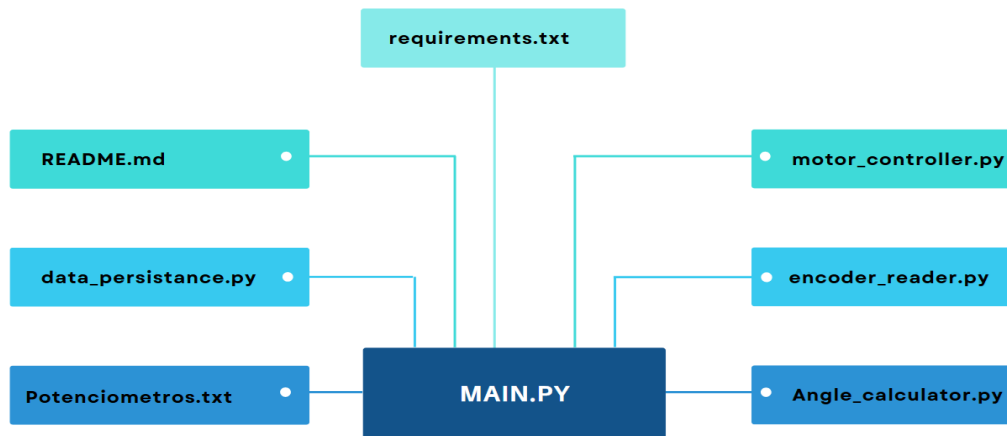
Apéndice G Repositorio GITHUB de los códigos

<https://github.com/Cartista/TdeG2025/tree/main>

Apéndice H. *Diagrama Solid*



Apéndice I. Diagrama de estructura modular del software implementado



Apéndice J. *Algoritmo de Control.*

