

Diseño y puesta en marcha de un seguidor solar de dos ejes.

Daniel Augusto García Gómez, Michael Geovanny Urbano Benítez y Yohan Sebastián Murillo

Padilla

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Electrónico e Ingeniero Electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi amada madre Carola Gómez Carreño y mi querido padre Javier José García Gómez quienes con su incondicional apoyo estuvieron en todos y cada uno de los momentos difíciles por los que pase, gracias a los cuales puedo mostrar el día de hoy que sus esfuerzos se ven reflejados en la gran persona y excelente profesional en que me he convertido.

A mis abuelas Ana del Carmen y Petrona Gómez las cuales me ayudaron a desarrollarme desde pequeño dándome siempre el amor y cariño que todo niño necesita.

A mi bella novia Daniela Mantilla Mantilla quien me acompañó y me apoyó en la culminación de mi época universitaria.

A todos quienes me tendieron su mano siendo un foráneo y me hicieron sentir como uno de los suyos brindándome su amistad, apoyo y cariño.

A todos mil y mil gracias, les deseo lo mejor y ojalá sigan a mi lado para apoyarnos mutuamente en este caminar de la vida.

Daniel Augusto

Dedicatoria

A Dios, fuente de vida y sabiduría, por guiarnos hasta este momento, por escuchar nuestras oraciones y guiar nuestras vidas con su majestuosa voluntad.

A mi madre, Emerita, mujer guerrera cuya infinita fortaleza hizo posible este logro. Agradecido por su apoyo incondicional, sus oraciones constantes y su voz alentadora que me impulsó a seguir luchando.

A mi novia y amiga, Daniela, por ser un pilar fundamental en cada aspecto de este camino. Agradezco cada palabra de aliento que me brindó y cada buena acción que tuvo conmigo, siendo una de las personas más importantes en mi vida.

A todas las personas que influyeron en mi aprendizaje, compartiendo su sabiduría y ofreciendo valiosos consejos para lograr mis metas. También agradezco a mis amigos de bienestar universitario, personas de corazón noble, que siempre me brindaron su cariño, apoyo y amistad.

A todos, infinitas gracias.

Sebastian Murillo Padilla

Dedicatoria

Agradezco a DIOS por ser fuente de fortaleza e inspiración. Su amor incondicional y gracia han sido sostén y luz en los momentos difíciles de mi vida.

A mi amada madre, Fany Belsy Benítez Prieto, qué aunque físicamente ya no esté presente, su amor continúa siendo mi mayor motor. En el cielo, imagino su sonrisa y siento su abrazo reconfortante. Esta tesis es un tributo a su memoria, a la mujer fuerte y amorosa que fue, a su sabiduría y al amor eterno que dejó en mi corazón.

A mi amado padre, Yobany Urbano Martínez y querido hermano, Kewin Urbano Benítez, agradezco su apoyo, complicidad y dedicación constante. Han sido guía en este viaje académico. Reconozco y agradezco sus sacrificios y la influencia positiva que hoy se refleja en esta tesis.

A mi amor eterno, María Fernanda Pico Lara, por su paciencia, comprensión y amor, que han sido mi refugio desde que inició esta travesía académica. Agradezco su constante apoyo y aliento. Esta tesis es sinónimo de fortaleza e inspiración que encuentro en nuestro amor.

A la familia Pico Lara, por acogerme con amor y hacerme sentir parte de su hogar. Su apoyo y afecto han sido fundamentales en mi vida. Esta tesis también es un reconocimiento a la calidez y a su generosidad familiar.

Con gratitud y amor,

Michael Urbano Benítez

Agradecimientos

A Dios, quien ha sido la luz guía en este viaje académico, expresamos nuestro agradecimiento por Su constante inspiración, fortaleza y dirección en cada paso que hemos dado.

A la Universidad Industrial de Santander, agradecemos sinceramente por ofrecernos no solo conocimiento académico de calidad, sino también un entorno propicio para crecer, aprender y alcanzar nuestras metas educativas.

A la Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica (E3T), agradecemos por su dedicación a la excelencia académica, por brindarnos las herramientas necesarias y por fomentar nuestro desarrollo profesional.

Al PhD. Germán Osma Pinto, le dedicamos nuestro agradecimiento especial por su orientación experta, apoyo incondicional y dedicación incansable a nuestra formación académica como director del presente trabajo de grado.

A los docentes de la Universidad Industrial de Santander, quienes han compartido su conocimiento con pasión y dedicación, y a nuestros queridos compañeros de estudio, agradecemos por la colaboración, el compañerismo y el intercambio de experiencias que han enriquecido nuestra trayectoria académica.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos.....	21
1.1 Objetivo General.....	21
1.2 Objetivos Específicos.....	21
2. Diagnóstico y adecuaciones necesarias para la puesta en marcha	22
2.1 Diagnóstico	22
2.1.1 Inspección	22
2.1.2 Limpieza y lubricación	24
2.1.3 Comprobación de cables	27
2.1.4 Revisión de componentes electrónicos	28
2.1.5 Verificación y prueba de servomotorreductores	29
2.2 Adecuaciones necesarias.....	30
2.2.1 Actualización de componentes obsoletos	32
2.2.2 Sustitución de cables dañados.....	33
3. Diseño y puesta en marcha de un seguidor solar	34
3.1 Selección de sensores (posición, orientación y temperatura del panel).....	36
3.1.1 Encoder Rotativo KY-040	36
3.1.2 Piranómetro DAVIS 6450.....	37
3.1.3 Anemómetro con veleta DAVIS 6410.....	38
3.1.4 Sensor de temperatura termocupla DS18B20	39
3.2 Selección de plataforma de control.....	41

3.2.1 Arduino Mega	42
3.2.2 Raspberry Pi 3 B +	44
3.2.3 Driver L298N.....	45
4. Definición de la estrategia de monitorización de variables eléctricas, microclimáticas y operativas	48
4.1 Variables eléctricas	49
4.2 Variables microclimáticas.....	52
4.3 Variables operativas	59
5. Implementación de la etapa de control y estrategia de monitorización	62
5.1 Etapa de control	63
5.2 Limitación y seguridad	64
5.3 Desarrollo del código y tecnología utilizada	65
5.3.1 Pplib Posición solar.....	68
5.3.2 Formato	69
5.3.3 Encoders posición del panel FV	71
5.3.4 Seguridad	72
5.3.5 Comparador.....	72
5.3.6 Actuador.....	73
6. Creación de aplicativo online para la visualización de variables monitorizadas	74
7. Pruebas al seguidor solar y valoración de operación	79
7.1 Planificación pruebas a seguidor solar.....	81
7.1.1 Evaluación de movimiento azimutal y cenital	81
7.1.2 Planificación monitorización de variables microclimáticas	84

7.1.4 Planificación monitorización y evaluación de variables eléctricas.....	86
7.2 Calibración inicial del seguidor solar	87
7.2.1 Verificación posición actual de panel FV	88
7.2.2 Verificación de posición solar	89
7.2.4 Resultados de calibración	90
7.3 Valoración y pruebas de movimiento azimutal y cenital.....	91
7.3.1 Registro de ángulos de movimiento.....	91
7.3.2 Comparación de mediciones	94
7.3.3 Análisis de desviaciones de movimiento	95
7.4 Pruebas y valoración de variables microclimáticas	96
7.4.1 Irradiancia solar horizontal y en panel FV.....	96
7.4.2 Variación de energía incidente.....	100
7.4.3 Temperatura de panel FV y ambiente	102
7.4.4 Dirección del viento.....	104
7.4.5 Velocidad del viento	105
7.5 Valoración de consumo de energía	108
7.5.1 Dispositivos electrónicos de control y monitorización	108
7.5.2 Dispositivos de potencia	109
8. Conclusiones.....	111
9. Recomendaciones	114
Referencias Bibliográficas	116
Apéndices.....	119

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características de ARDUINO MEGA.....	43
Tabla 2. Características de Raspberry Pi 3 B +.	45
Tabla 3. Características de Driver L298N.	46
Tabla 4. Estrategia de monitorización.	48
Tabla 5. Relación entre variables eléctricas, equipos, datos de ubicación y operación.....	50
Tabla 6. Relación entre variables microclimáticas, equipos, datos de ubicación y operación. ...	52
Tabla 7. Relación entre variables operativas, equipos, datos de ubicación y operación.	60
Tabla 8. Algoritmo de control.....	63
Tabla 9. Limitación y seguridad tomada en cuenta.	64
Tabla 10. Conversión ángulo azimutal	69
Tabla 11. Conversión ángulo cenital	70
Tabla 12. Relación entradas-giro	74
Tabla 13. Variables del medidor Ev390.	76
Tabla 14. Procedimiento de comparación y toma de datos de movimiento.	83
Tabla 15. Herramientas de medición y comparación.....	86
Tabla 16. Etapas y métodos de medición de consumo y generación de energía.	87
Tabla 17. Resultados de calibración del seguidor solar.....	91
Tabla 18. Registro de fotografías de la bóveda celeste.....	92
Tabla 19. Valores de error porcentual promedio	95
Tabla 20. Porcentaje de incremento de la captación de luz solar.	101
Tabla 21. Consumo de energía en dispositivos de control e instrumentación electrónica.	108

Tabla 22. Cantidad de movimientos y su duración estimada.....	109
Tabla 23. Consumo de energía de los servomotores.....	110
Tabla 24. Consumo global del seguidor.	111

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Principales componentes del sistema.	19
Figura 2. Descripción del estado inicial y final del seguidor solar.	20
Figura 3. Inspección y diagnóstico a estructura del seguidor solar.	24
Figura 4. Limpieza y lubricación a mecanismos de giro de elevación.	26
Figura 5. Comprobación inicial de cables del sistema eléctrico y electrónico del seguidor solar.	27
Figura 6. Revisión de componentes electrónicos.	29
Figura 7. Verificación y prueba de funcionamiento de servomotorreductores.	30
Figura 8. Adecuaciones en nuevo tablero de potencia y control.	31
Figura 9. Revisión, diagnóstico y adecuación de sensores.	33
Figura 10. Diagrama de bloques diseño y puesta en marcha.	35
Figura 11. Selección de sensor Encoder Rotativo KY-040.	37
Figura 12. Selección de sensor irradiancia solar- piranómetro DAVIS 6450.	38
Figura 13. Selección de anemómetro con veleta Davis	39
Figura 14. Selección de sensor de temperatura termocupla DS18B20.	40
Figura 15. Diseño plataforma de control en SketchUp.	42
Figura 16. Partes relevantes de Arduino Mega.	43
Figura 17. Raspberry Pi 3 Modelo B +.	44
Figura 18. Driver L298N.	46
Figura 19. Diseño preliminar de conexiones del sistema.	47
Figura 20. Medidor PWRcheck.	51

Figura 21. Medidor AcuDC serie 240.....	51
Figura 22. Medidor EV390.....	52
Figura 23. Esquema de conexión piranómetro DAVIS 6450.	54
Figura 24. Esquema de conexión física de piranómetros a Arduino.	55
Figura 25. Esquema de conexión anemómetro y veleta DAVIS 6410.	56
Figura 26. Esquema de conexión física anemómetro Davis a Arduino.	57
Figura 27. Diagrama de bloques del sensor DS18B20.	58
Figura 28. Esquema de conexión física termocuplas a arduino.	59
Figura 29. Diseño de dispositivo que establece el umbral de movimiento.....	61
Figura 30. Sistema de control de seguidor solar en lazo cerrado.....	63
Figura 31. Funcionamiento del código.	65
Figura 32. Posición solar respecto a un observador en tierra.	67
Figura 33. Diagrama de código para el control del seguidor solar.	68
Figura 34. Repetición ángulo de elevación.....	70
Figura 35. Diagrama de conexiones para el algoritmo de control.	71
Figura 36. Entradas digitales módulo L298N.....	73
Figura 37. Sitio web de Google.	75
Figura 38. Esquema I/O del aplicativo web.....	77
Figura 39. Paso a paso publicación de variables medidas.	78
Figura 40. Interfaz web.....	79
Figura 41. Movimiento cenital y azimutal para el seguidor solar.....	81
Figura 42. Ubicación de la cámara para tomar registro fotográfico de la bóveda celeste.	82
Figura 43. Complemento de ángulo cenital.	83

Figura 44. Código QR para acceder al sitio web	85
Figura 45. Calibración del seguidor solar con respecto a la posición del sol.	88
Figura 46. Interfaz aplicación ANGLE METER	89
Figura 47. Interfaz aplicación SUN LOCATOR	90
Figura 48. Medición de azimut del panel FV con respecto a la ubicación del sol, para el día 18 de noviembre 2023	93
Figura 49. Medición de elevación del panel FV con respecto a la ubicación del sol, para el día 18 de noviembre de 2023.	94
Figura 50. Prueba bloqueo de irradiancia solar a piranómetros.....	97
Figura 51. Curva de irradiancia solar.....	98
Figura 52. Comparación Diaria de Irradiancia solar entre Gh y Ginc.	99
Figura 53. Variación de energía incidente para 3 días de medición.	100
Figura 54. Pruebas de temperatura a termocuplas	102
Figura 55. Curva de temperaturas de operación	103
Figura 56. Pruebas de dirección del viento en veleta.....	104
Figura 57. Curva de dirección del viento.....	105
Figura 58. Pruebas de velocidad del viento a anemómetro.	106
Figura 59. Curva de velocidad del viento	106
Figura 60. Correlación de irradiancia con la velocidad del viento	107
Figura 61. Gráfica de movimiento del seguidor y su estimación de potencia a lo largo de un día de operación.	110

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Diseño del sistema de seguimiento solar en SketchUp	119
Apéndice B. Comparación para la selección de Encoder KY-040	120
Apéndice C. Comparación para la selección de Arduino Mega	121
Apéndice D. Comparación para la elección de Raspberry Pi 3 B +.	123
Apéndice E. Comparación para la elección de Driver L298N.....	125
Apéndice F. Diseño preliminar y planos eléctricos del sistema de control del seguidor solar... ..	126
Apéndice G. Ecuaciones útiles para cálculos de posición solar.	131
Apéndice H. Plan de mantenimiento del seguidor solar	135
Apéndice I. Código de control y monitorización de datos.....	137
Apéndice J. Código utilizado para la monitorización de variables microclimáticas	139
Apéndice K. Medición de azimut y elevación del panel FV con respecto a la ubicación del sol, para el día 18 de noviembre 2023	141

Resumen

Título: Desarrollo de la etapa de control y puesta en marcha de un seguidor solar de dos ejes*

Autores: Daniel Augusto García Gómez, Michael Geovanny Urbano Benítez, Yohan Sebastián Murillo Padilla**

Palabras claves: Seguidor solar, monitorización, Arduino, Raspberry, programación.

Descripción:

Con el propósito de contribuir a la apropiación de soluciones fotovoltaicas en la E3T, se ha impulsado desde hace años la puesta en marcha de un seguidor solar de dos ejes de libertad completamente funcional para analizar su beneficio energético y apropiar los principios básicos de funcionamiento, el cual está conformado por un panel FV (250 W), un microinversor (M250 Enphase), una estructura de soporte, dos servomotores y un medidor de energía (EV390 Accuenergy).

Antes del inicio de este trabajo de grado, ya se había logrado la instalación de los componentes mencionados y pruebas preliminares de movimiento. No obstante, desde 2018 no se realizaron intervenciones. Por tal razón, este trabajo busca lograr la funcionalidad plena del seguidor solar. Inicialmente, se realiza un diagnóstico detallado y las adaptaciones básicas de acondicionamiento del sistema, lo cual abarcó inspección, limpieza, verificación de conexiones, cables y componentes electrónicos y la sustitución de aquellos en mal estado. Seguidamente, se abordó el diseño de la etapa de control que incluyó la selección de Encoder rotativos, una Raspberry Pi 3B +, un driver L298N y la programación en *Python* para establecer una comunicación efectiva para lograr el movimiento del panel FV.

En la etapa de monitorización, se integraron los siguientes sensores: dos piranómetros DAVIS 6450 para estimar la ganancia de la irradiancia solar incidente sobre el panel FV en comparación con lo recibido sobre una superficie horizontal, un anemómetro con veleta para medir la velocidad y dirección del viento en el sitio, y tres termocuplas para estimar la temperatura operativa del panel FV y la temperatura del aire circundante. La consulta de los datos obtenidos se soporta en una página web (*Google Site*). Además, se llevaron a cabo tanto estimaciones de la potencia y energía requeridas para el funcionamiento del seguidor como de la ganancia de irradiación debido al movimiento del seguidor.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director Germán Alfonso Osma Pinto - Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Development of the control stage and commissioning of a two-axis sun tracker*

Author: Daniel Augusto García Gómez, Michael Geovanny Urbano Benítez, Yohan Sebastián Murillo Padilla**

Key words: Suntracker, monitoring, Arduino, Raspberry Pi, programming.

Description:

In order to promote the adoption of photovoltaic solutions within the E3T, the development of a dual-axis solar tracker has been championed for several years. This initiative aims to evaluate its energy benefits and to understand the foundational operational principles. The system comprises a PV panel (255 W), a microinverter (M250 Enphase), a mounting structure, two servo motors, and an energy meter (EV390 Accuenergy).

Before this thesis project began, the installation of the aforementioned components and preliminary movement tests had been completed. However, no modifications or interventions have been made since 2018. Therefore, the objective of this work is to ensure the solar tracker's full functionality. The first step involved a comprehensive assessment and necessary modifications to the system. This included inspecting, cleaning, verifying connections, cables, and electronic components, and replacing those that were deteriorated. Subsequently, the control phase design was tackled, which incorporated the selection of rotary encoders, a Raspberry Pi 3B+, an L298N driver, and *Python* programming to enable efficient communication for the PV panel's movement.

In the monitoring stage, the following sensors were integrated: two DAVIS 6450 pyranometers to estimate the solar irradiance gain incident on the PV panel compared to that received on a horizontal surface, an anemometer with wind vane to measure wind speed and direction at the site, and three thermocouples to estimate the operating temperature of the PV panel and the temperature of the surrounding air. The consultation of the data obtained is supported on a web page (Google Site). In addition, estimates of the power and energy required for the operation of the tracker and the irradiation gain due to the movement of the tracker were carried out.

* Work of Grade

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director Germán Alfonso Osma Pinto - Doctor en Ingeniería.

Introducción

Bucaramanga, conocida como la "Ciudad Bonita" de Colombia, se destaca por su generosa disponibilidad de irradiación solar. Según los registros de la estación climatológica de la CDMB, en el primer semestre del año 2022, se alcanzó una irradiación máxima de 1.226 W/m^2 (CDMB, 2022, pág. 34). Además, la región cuenta con una irradiación diaria promedio entre 4,5 y 5,0 kWh/m^2 que se mantiene mayoritariamente estable durante todo el año (Vergara-Barrios, Rey-López, Osma-Pinto, & Ordóñez-Plata, 2014).

En este contexto, los seguidores solares dinámicos son consideradas soluciones que favorecen la captación de energía solar al ajustar automáticamente la orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos (FV) a lo largo del día, lo que puede incrementar la ganancia solar para la ciudad de Bucaramanga en promedio hasta un 20% al año (Osma Pinto, 2011), en comparación con sistemas estáticos. Esta mejora conlleva tanto beneficios financieros y energéticos como aporte a la lucha contra el cambio climático.

Es por esta razón que, la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander busca disponer de un seguidor solar operativo de dos ejes. Hasta inicios de 2023, se realizó un trabajo de grado (Miranda Guerra, Tamayo Argüello, & Barrios Sánchez, J. 2016) que logró el montaje y operación básica del seguidor solar conformado por un panel FV, un microinversor, dos servomotores y tarjetas de desarrollo.

No obstante, diversos obstáculos como la complejidad del sistema, daños de componentes, limitaciones de recursos debido a la pandemia y la falta de elementos de control y monitorización, han impedido su operación completa y continua.

Es por esto que, este trabajo de grado se enfoca en desarrollar la etapa de control para lograr un funcionamiento continuo basado en cálculos de ubicación solar. También se incorporan instrumentos para la monitorización de variables microclimáticas y operativas con miras a una futura etapa de comunicación y control vía Internet. Para ello, se utilizaron técnicas de programación, instrumentación electrónica y automatización de procesos.

En lo que respecta a la información técnica del sistema, se relacionan a continuación sus componentes mostrados en las figuras 1 y 2:

- Panel FV de 250 W - UP-M250P
- Microinversor Enphase M250
- Dos servomotorreductores DFS10G-05 asociados a los ejes de azimut y elevación (24Vdc, 0.54 A, 96 rpm)
- Estructura de soporte metálico está diseñada en forma de "H" utilizando ángulos de hierro de 1 pulgada para sostener el panel FV. Además, se incorpora un módulo de base y protección en forma de cubo que aloja el eje de movimiento azimutal en su interior, mientras que en la parte superior se encarga de soportar el eje de movimiento de elevación. En la parte posterior de esta estructura se ubican dos tableros donde se instalan los circuitos de control y potencia, respectivamente.
- Puntos de alimentación distribuidos de manera estratégica para garantizar una conexión eléctrica AC.

- El circuito de control y potencia está protegido por dos interruptores automáticos de 3 A que ofrecen protección contra sobrecargas y cortocircuitos.

Figura 1.

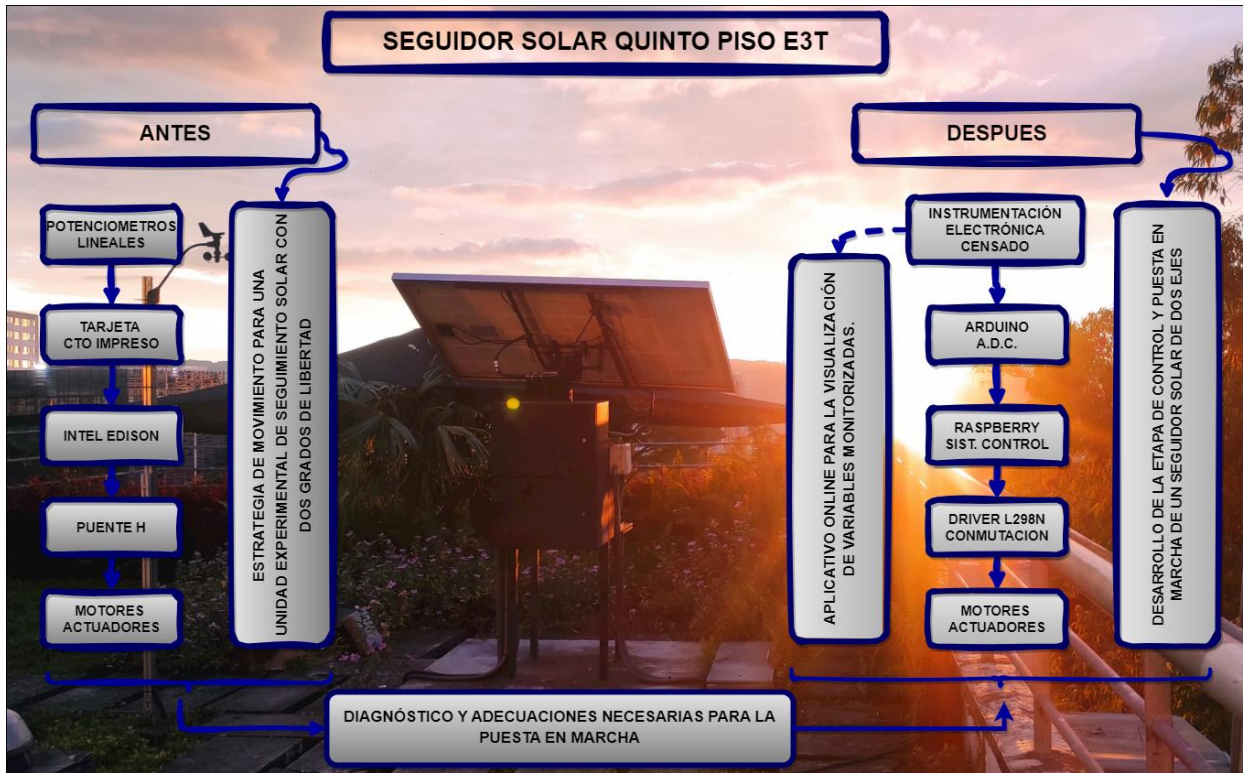
Principales componentes del sistema.



Nota: La figura ilustra los principales componentes del sistema de seguimiento solar, entre los cuales están, el panel FV *UPM 250*, microinversor *ENPHASE M250*, servo-motorreductores de azimut y elevación, estructura soporte, tablero de alimentación de energía y control.

Figura 2.

Descripción del estado inicial y final del seguidor solar.



Nota: La figura representa la estrategia de movimiento en su fase inicial, cuando se diseñó el sistema de seguimiento solar, y en su fase final, después de haber realizado diagnósticos y ajustes para su puesta en marcha.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar la etapa de control para la puesta en marcha de un seguidor solar ubicado en el quinto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar diagnóstico y adecuaciones necesarias para la puesta en marcha del sistema del seguidor solar existente.

Diseñar la etapa de control para el movimiento de un panel fotovoltaico.

Definir la estrategia de monitorización de variables eléctricas, microclimáticas y operativas asociadas al seguidor solar.

Implementar la etapa de control y estrategia de monitorización.

Crear un aplicativo online para la visualización de variables monitorizadas.

Realizar pruebas al seguidor solar para valorar su operación.

2. Diagnóstico y adecuaciones necesarias para la puesta en marcha

La puesta en marcha de un seguidor solar que estuvo inactivo cerca de 6 años implicó un proceso metódico. En primer lugar, se realizó un diagnóstico exhaustivo que permitió la identificación de desgastes, daños o componentes obsoletos, brindando una visión completa del estado general del sistema. Posteriormente, se llevó a cabo la limpieza y lubricación de los componentes mecánicos para asegurar un movimiento sin fricciones. La verificación del cableado eléctrico se realizó para garantizar una conexión sin problemas, abordando cualquier problema detectado a través de reparaciones o reemplazos. Asimismo, se efectuó una revisión de los componentes electrónicos y pruebas de los servomotores para determinar las adaptaciones necesarias y asegurar una operación correcta en cuanto al movimiento del panel FV.

2.1 Diagnóstico

2.1.1 Inspección

Se llevó a cabo una inspección minuciosa del seguidor solar para evaluar el estado de sus componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, identificando daños, corrosión o componentes obsoletos. Se aplicaron prácticas de seguridad, incluyendo el uso de elementos de protección personal, desconexión de la fuente de energía, verificación de la ausencia de corriente eléctrica, señalización del área de trabajo y bloqueo de componentes móviles. Además, antes de su puesta en marcha, se realizó una inspección visual para asegurar que los componentes estuviesen en buen

estado y operación correcta. A continuación, se nombran las partes del seguidor solar intervenidas e inspeccionadas.

Estructura mecánica: Se verifica la integridad de la estructura del seguidor solar, encontrando signos de corrosión, oxidación y algunos daños estructurales.

Panel FV: Se examina la existencia de grietas u otro tipo de daño en el panel FV. Se verifica que el panel esté limpio y libre de acumulaciones de suciedad, polvo o escombros.

Sistemas de montaje: Se revisa el sistema de montaje y sujeción del panel FV; específicamente, que no haya tornillos sueltos o faltantes y se verifica si hay desalineación del panel FV debido a la exposición prolongada a eventos climáticos.

Estructura de seguimiento: Se inspeccionan los servomotores, transmisión, acoples y sistemas de engranajes, buscando signos de daños, corrosión o desgaste excesivo. Se verifica que los mecanismos de movimiento se muevan suavemente y no haya obstrucciones.

Sensores: Se revisa tanto anemómetro, utilizado para medir variables microclimáticas, como los potenciómetros lineales, utilizados para determinar la posición angular en la que se encuentra el panel FV. Se asegura su limpieza e integridad. Se verifica que los cables de conexión estén en buen estado y correctamente canalizados hacia la estructura del gabinete de control.

Cables y conexiones: Se inspeccionan todos los cables y conexiones eléctricas en busca de daños, cortes o conexiones sueltas, verificando la integridad del aislamiento de los cables.

Controlador y electrónica: Se examina el controlador y otros componentes electrónicos para detectar signos de daños físicos o corrosión en las placas de circuito. Se verifica que los componentes electrónicos estén bien sujetos y no haya soldaduras rotas.

La Figura 3 muestra el estado inicial de la estructura del seguidor solar y la inspección de tornillería acoples y sujeciones existentes.

Figura 3.

Inspección y diagnóstico a estructura del seguidor solar.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el estado visual inicial del seguidor solar, la inspección de tornillería, acoples y sujeciones existentes.

2.1.2 Limpieza y lubricación

Se realiza limpieza adecuada para garantizar un correcto funcionamiento y se toma nota de cualquier componente que pueda requerir reparación, reemplazo o mantenimiento adicional después de la limpieza. Aquí hay algunas áreas que se limpiaron y lubricaron:

Panel FV: Se limpia la superficie del panel para eliminar acumulaciones de polvo, suciedad, escombros y otros contaminantes. Esto favorece la eficiencia de la captación de energía solar. Se utiliza agua y jabón suave (ph neutro), evitando el uso de productos químicos abrasivos que puedan dañar la superficie.

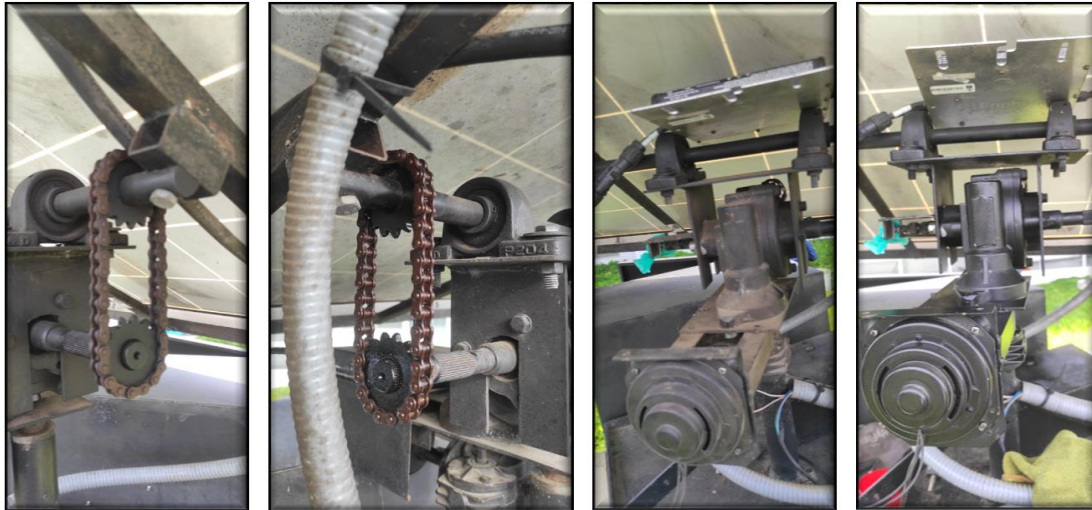
Sistemas de montaje: Se limpian los sistemas de montaje y estructuras donde está instalado el panel FV, eliminando hojas, vegetación, insectos, polvo, desechos eléctricos y otros materiales se acumularon durante el tiempo.

Mecanismos de movimiento y estructura de seguimiento: Se lubrican los mecanismos de movimiento, como servomotores, engranajes, cadena, chumaceras, ejes y transmisión para garantizar un funcionamiento suave y libre de fricción. Se utiliza lubricante “CRC-556” que es una sustancia altamente viscosa, la cual penetra en lugares estrechos de difícil acceso. Con éste se lubrican todas las partes metálicas de movimiento reduciendo la fricción y mejorando el deslizamiento entre superficies.

La Figura 4 ilustra el estado inicial de la cadena, los ejes y el mecanismo de elevación del seguidor solar. Debido a su exposición a las condiciones climáticas, estos componentes sufren desgaste y corrosión con el tiempo. Por lo tanto, es necesario establecer un programa de mantenimiento regular que abarque la inspección de las piezas móviles, la aplicación de lubricación adecuada, la protección contra la corrosión, el mantenimiento de la alineación, y el registro y documentación de las actividades realizadas. Además, se ilustra la fase de inspección y mantenimientos correspondientes como parte del proceso de puesta en marcha.

Figura 4.

Limpieza y lubricación a mecanismos de giro de elevación.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el estado inicial de la cadenilla, ejes, piñones de rotación, la limpieza y lubricación de lo anterior y la estructura de seguimiento con su respectivo mantenimiento.

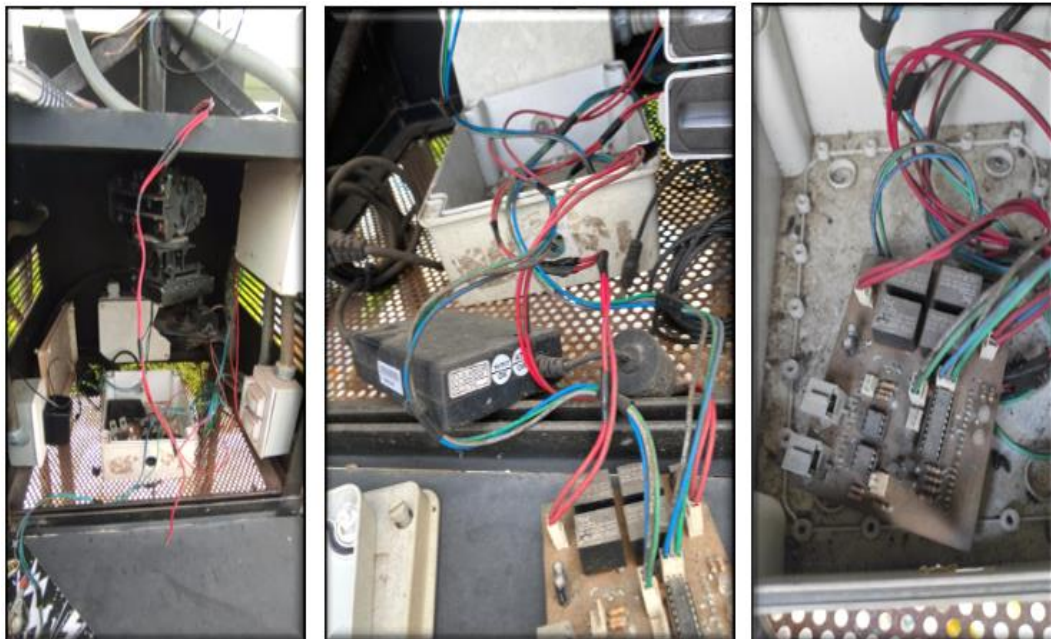
Controlador y electrónica: Se limpia la tarjeta de circuito impreso, la cual tiene un módulo de potencia puente H para controlar la potencia de los actuadores y componentes electrónicos para la captación de datos. Con una brocha suave y con un paño seco se elimina el polvo y la suciedad superficial; adicionalmente, se usa “CRC limpia contactos” que es un producto para limpiar y proteger conexiones eléctricas y electrónicas, eliminar la suciedad, el óxido, la corrosión y otros contaminantes que pueden afectar la conductividad y el rendimiento de las conexiones eléctricas.

2.1.3 Comprobación de cables

La comprobación de cables se realiza para verificar deterioro, continuidad eléctrica, corrosión o daños a lo largo del tiempo. Inspeccionar su integridad es fundamental para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente. Tal como muestra la Figura 5, después de la inspección de todos los cables en el sistema del seguidor solar, se buscan signos de desgaste, cortes, daños en el aislamiento, corrosión o conexiones sueltas. Se presta especial atención a las áreas donde los cables pasan por abrazaderas, conectores y puntos de contacto.

Figura 5.

Comprobación inicial de cables del sistema eléctrico y electrónico del seguidor solar.



Nota. Las imágenes representan la inspección del estado inicial del sistema de control de movimiento del seguidor solar (cables, conectores, circuito impreso de control de movimiento y adquisición de datos).

Se verifican las conexiones eléctricas, incluidos conectores, terminales y empalmes, para asegurar la correcta sujeción. Por otra parte, se realiza medición de continuidad con un multímetro, lo cual ayuda a detectar posibles cortocircuitos, cables rotos o conexiones defectuosas; también realizando el mismo procedimiento para los cables de comunicación, como los cables de red.

Al encontrar algunos cables dañados, corroídos o en mal estado, éstos fueron reemplazados con cables nuevos. Adicionalmente, se aplicaron productos de protección, como fundas termoencogibles en las conexiones para prevenir la corrosión futura.

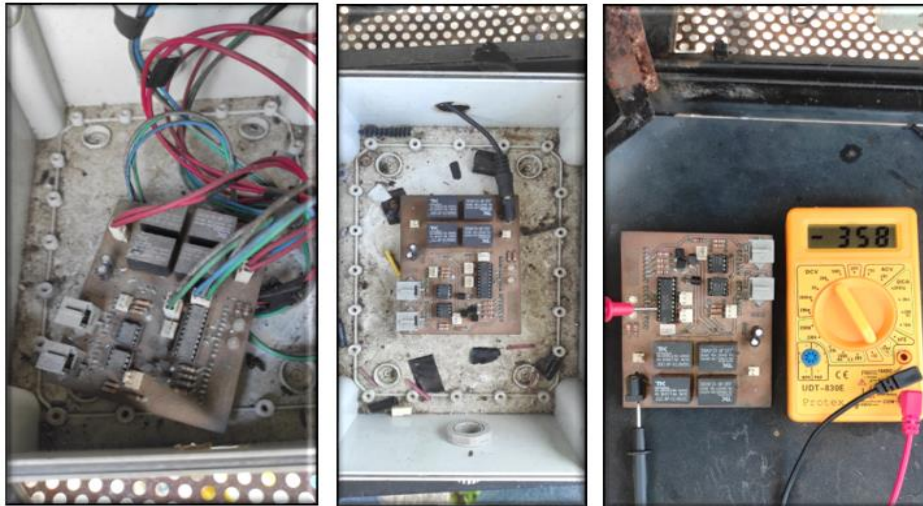
2.1.4 Revisión de componentes electrónicos

La revisión de componentes electrónicos es esencial para garantizar su buen funcionamiento, prevenir fallos y mantener la seguridad en la operación del sistema. Permite detectar problemas tempranamente y evitar riesgos como cortocircuitos o sobrecalentamiento.

La Figura 6 muestra el estado actual de la tarjeta de circuito impreso, la cual incluye componentes electrónicos para controlar el movimiento de elevación y azimut y conectores para comunicarse con sensores de irradiancia solar, velocidad y dirección del viento.

Figura 6.

Revisión de componentes electrónicos.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el estado inicial de la tarjeta de circuito impreso, la conexión a fuente de alimentación para detectar su encendido y la inspección de continuidad entre puntos de alimentación de energía.

Se inspeccionan sensores y componentes electrónicos como la tarjeta de potencia y de control, para detectar posibles daños visibles, encontrándose en mal estado impidiendo la conexión entre algunos dispositivos y ocasionando cortocircuito entre otros.

2.1.5 Verificación y prueba de servomotorreductores

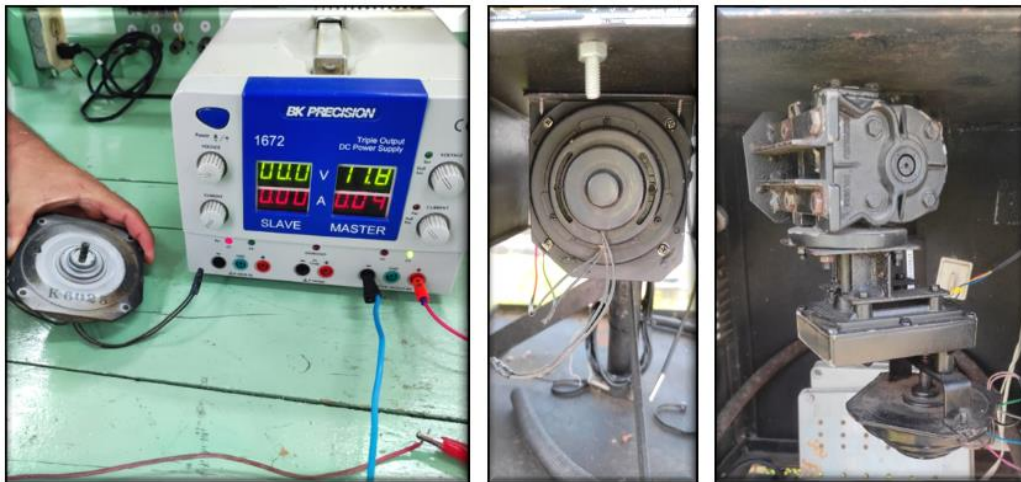
La verificación de los servomotorreductores asegura que funcionen correctamente y respondan a las señales de control, lo que garantiza la operación segura y eficaz del sistema.

Inicialmente, se desacoplan los servomotorreductores para identificar desgastes o daños; seguido a esto, se realiza un mantenimiento preventivo, lubricando y ajustando sus partes móviles

para evitar movimientos erráticos del panel FV, lo que podría representar un riesgo de seguridad tanto para las personas como para el equipo. La Figura 7 muestra la revisión del estado de los servomotores y sus componentes. Se realizan pruebas de movimiento en vacío y con carga para verificar su operación y consumo de energía.

Figura 7.

Verificación y prueba de funcionamiento de servomotorreductores.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el estado inicial de la tarjeta de circuito impreso, la conexión a fuente de alimentación para detectar su encendido y la inspección de continuidad entre puntos de alimentación de energía.

2.2 Adecuaciones necesarias

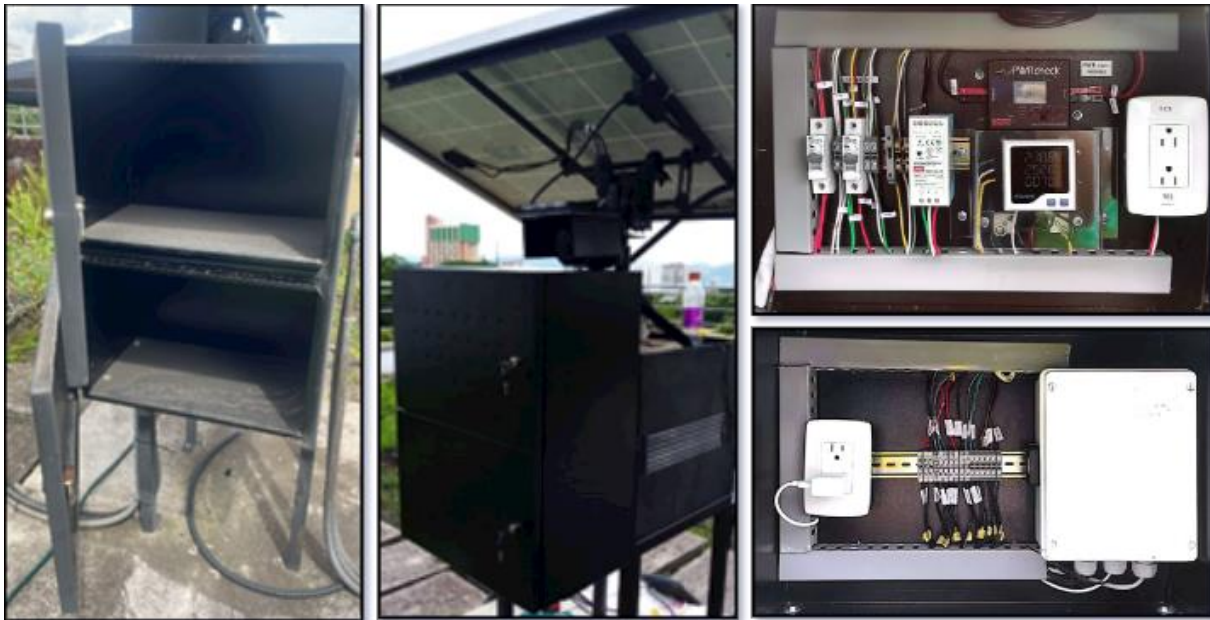
Las adecuaciones necesarias en las partes del sistema consideradas obsoletas son de gran importancia, ya que permiten llevar a cabo actualizaciones que mejoran su funcionamiento y eficacia. Estas mejoras comprenden la actualización de componentes, tanto en términos de

software como de hardware, la incorporación de sistemas de control más avanzados y la integración de instrumentación de censado, cuyos detalles se encuentran expuestos con más detalles en la Sección 3. Estos componentes desempeñan un papel esencial al garantizar un funcionamiento correcto del sistema; al tiempo que aseguran su compatibilidad con las últimas tecnologías disponibles en caso de que se desee ampliar el control o la instrumentación de éste.

La Figura 8 muestra los gabinetes que albergan la implementación y la integración del nuevo sistema de control y de potencia del seguidor solar.

Figura 8.

Adecuaciones en nuevo tablero de potencia y control.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el estado inicial y final de los gabinetes, su limpieza y adecuación para instalación del nuevo circuito de control y potencia del sistema.

En el gabinete superior se lleva a cabo la instalación del circuito de suministro eléctrico, proporcionando una tensión de entrada de 110 Vac para abastecer a los tomacorrientes del circuito y a la fuente de 24 Vdc. Esta última suministra energía al driver de potencia encargado de facilitar la conmutación del movimiento de los servomotores de azimut y elevación. Sumado a esto, en el gabinete inferior se coloca un conjunto de borneras de conexión. En la parte superior de este bloque se conectan las líneas que alimentan los servomotores y las señales procedentes de los instrumentos de medición de variables microclimáticas y operativas. Por otro lado, debajo de este bloque las mismas señales se direccionan hacia las tarjetas de desarrollo, control y potencia del sistema.

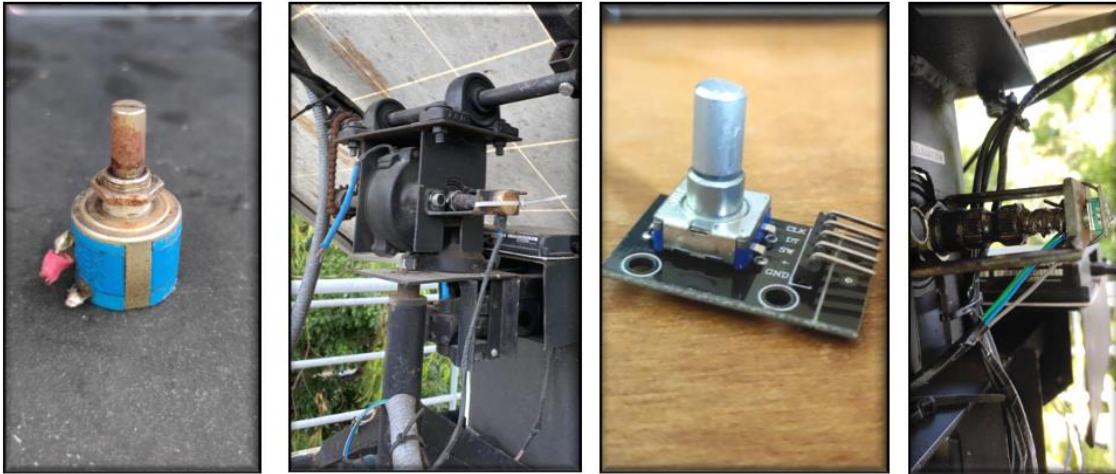
2.2.1 Actualización de componentes obsoletos

Al encontrar componentes obsoletos o inadecuados, se considera reemplazarlos por versiones más modernas y eficientes que permitan mayor precisión en el control del sistema. Entre los componentes actualizados están: *Raspberry pi 3B +*, *Arduino MEGA*, *Driver L298N*, *Encoder KY-040*, *sensor de temperatura Ds18b20*, *fuentes DC*, *medidor DC PWRcheck* y *piranómetro Davis*.

La Figura 9 muestra la situación inicial del sensor de posición angular de azimut y elevación, junto con la sustitución correspondiente por un codificador digital rotativo.

Figura 9.

Revisión, diagnóstico y adecuación de sensores.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha: el potenciómetro lineal BORNUS 3540, su instalación en eje de giro de elevación, el nuevo Encoder rotativo KY-040 y la instalación actualizada en el eje de transmisión de movimiento.

El Encoder ofrece una última mejora notable en la precisión de la medición angular, ya que es capaz de detectar movimientos pequeños con una alta resolución. Además, el uso de este codificador digital facilita su integración con microcontroladores electrónicos, lo que se traduce en una lectura más exacta y una comunicación más fluida con otros componentes del sistema.

2.2.2 Sustitución de cables dañados

Se encuentran cables dañados y en mal estado, en la parte de control, los cuales se sustituyen por cable nuevo calibre 18 AWG. Éstos se reemplazan para evitar problemas eléctricos a futuro.

3. Diseño y puesta en marcha de un seguidor solar

Después de verificar la funcionalidad de las partes del seguidor solar, se procede a diseñar una nueva etapa de control y de potencia. Esto se debe a que el circuito inicialmente instalado está obsoleto debido al daño en su tarjeta de potencia y la ausencia de su sistema de control. De igual forma, se exploran nuevas alternativas como el uso de tarjetas de desarrollo de bajo costo que ofrecen una amplia variedad de recursos de entrada y salida, así como una mayor capacidad de almacenamiento y análisis de datos. Esto se hace con el propósito de poner en marcha el sistema y, al mismo tiempo, posibilitar la futura integración de instrumentos de medición adicionales.

Por otra parte, se lleva a cabo la creación del modelo tridimensional de los componentes del sistema utilizando el software de diseño gráfico y modelado SketchUp, tal como muestra el Apéndice A. Este enfoque tiene como objetivo planificar la ubicación de los dispositivos e instrumentación electrónica, aprovechando el espacio disponible, mejorando la seguridad y maniobrabilidad en el control del sistema.

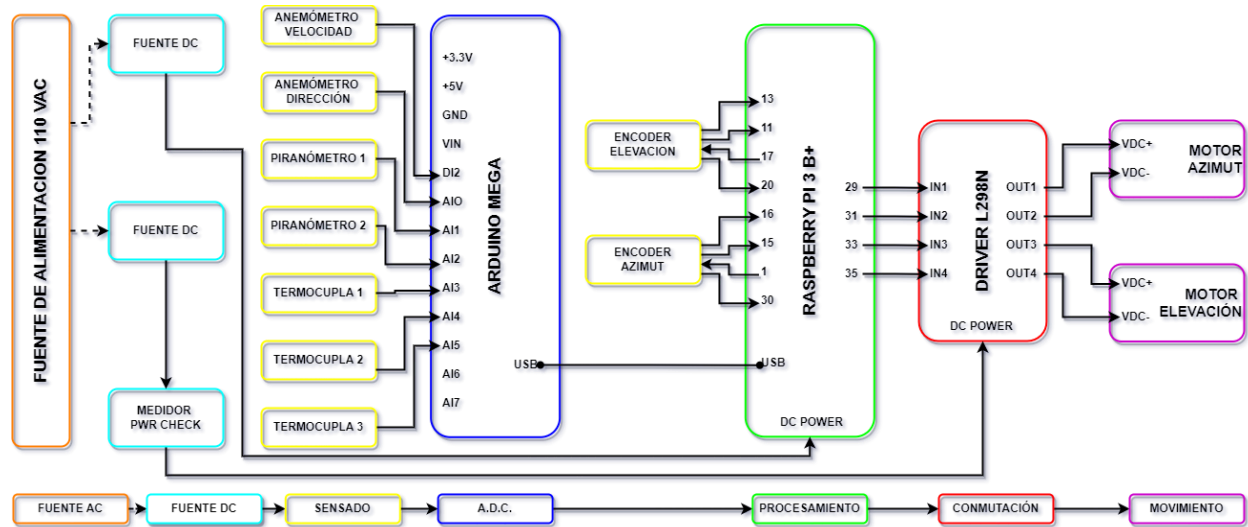
El diseño de la etapa de control para dar movimiento al seguidor solar conllevó desarrollar un sistema que permita orientar el panel FV hacia el haz de irradiación solar directa. Para esto, se hace la selección de mecanismos, sensores, microcontroladores, driver y componentes de éste.

La Figura 10 presenta el diseño realizado, utilizando una fuente de alimentación de CA de 110 V para energizar las fuentes de CC que alimentan las tarjetas RASPBERRY y el Driver L298N. Adicional, se muestran los bloques de sensado, como la posición de azimut y elevación

del panel FV, la velocidad¹ y dirección² del viento, la irradiancia solar horizontal³ e incidente sobre el panel FV⁴ y la temperatura tanto del panel FV⁵ como del aire circundante⁶.

Figura 10.

Diagrama de bloques diseño y puesta en marcha.



Dado que algunas señales son analógicas, se usa un microcontrolador ARDUINO como convertidor analógico a digital. Éste convierte las señales en formato digital para el microcontrolador RASPBERRY que ejecuta el programa de control y actúa sobre los servomotores del seguidor solar. A continuación, se realiza la selección de sensores, una nueva plataforma de control y de potencia.

¹ Anemómetro de cazoletas DAVIS 6410 (existencia previa en la E3T)

² Velea DAVIS 6410 (existencia previa en la E3T)

³ Piranómetro DAVIS 6450 1 (existencia previa en la E3T)

⁴ Piranómetro DAVIS 6450 2 (existencia previa en la E3T)

⁵ Termocupla DS18B20 1 Y 2

⁶ Termocupla DS18B20 3

3.1 Selección de sensores (posición, orientación y temperatura del panel)

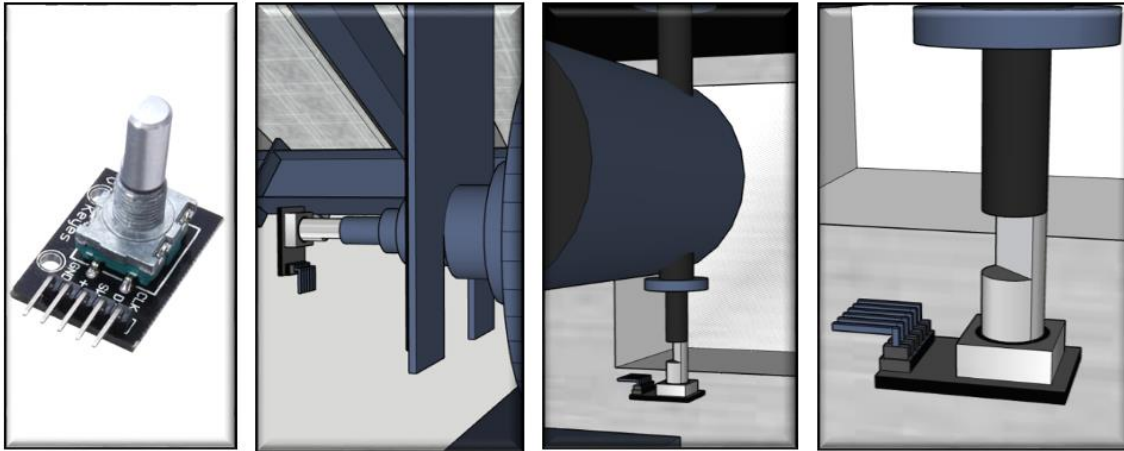
3.1.1 Encoder Rotativo KY-040

Es un sensor de posición angular para sistemas que requieren detección de rotación con buena exactitud. Es un dispositivo electromecánico que entrega una salida digital incremental que detecta el movimiento rotativo en incrementos discretos, generando una serie de pulsos eléctricos mientras se gira. La señal digital que indica la dirección de giro y el paso de la codificación se transmite de manera directa a la tarjeta de desarrollo RASPBERRY, funcionando como un sistema de retroalimentación de la posición del panel FV tanto en elevación como en azimut.

La selección del sensor Encoder Rotativo KY-040 se fundamentó en su exactitud, durabilidad, facilidad de integración y su asequible costo, convirtiéndose en la opción ideal para la aplicación de seguimiento solar. Para tomar esta decisión, se realizaron comparaciones de sus características con otros sensores similares disponibles en el mercado, como el KY-022, EC11 y BOURNS PEC1. Los resultados de esta comparación se detallan en el Apéndice B. La Figura 11 muestra el diseño del Encoder y su acoplamiento en los ejes de transmisión de salida de cada servomotor-reductor.

Figura 11.

Selección de sensor Encoder Rotativo KY-040.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el sensor Encoder KY-040, el diseño de este en SketchUp y su instalación en eje de giro de elevación y azimut.

3.1.2 Piranómetro DAVIS 6450

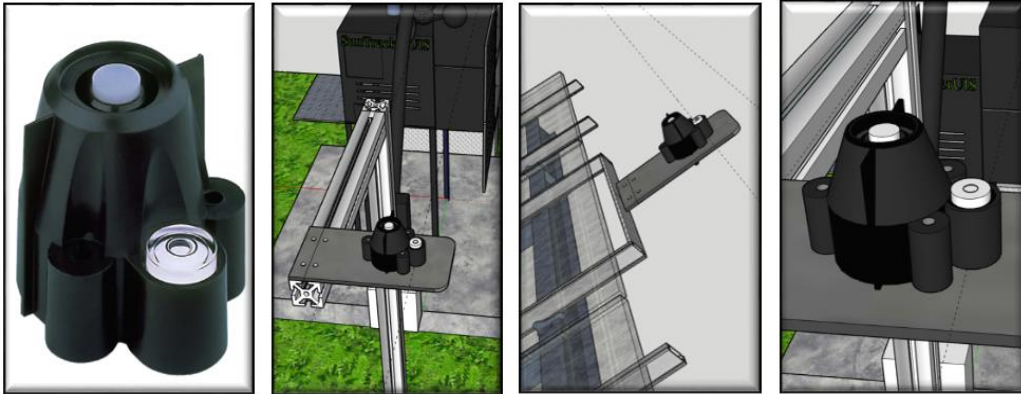
Es un instrumento utilizado para medir la irradiancia solar incidente en una superficie a partir de una señal eléctrica de tensión continua proporcional. Este dispositivo es reconocido por su exactitud y confiabilidad en la medición, cualidades esenciales para el seguimiento solar y la eficiencia del panel FV. Este sensor exhibe durabilidad y resistencia a las condiciones climáticas adversas, lo que garantiza un rendimiento constante a lo largo del tiempo. Se integra al sistema de monitorización y control gracias a su compatibilidad con Arduino, el cual recibe y procesa su señal analógica para su monitorización adecuada.

Se usó este modelo dado que ya se contaban con estas dos unidades. Uno fue instalado en el poste de medición de dirección y velocidad del viento; el otro se ubicó en la estructura del panel FV. Con el fin de planificar la ubicación de los sensores de irradiancia, se lleva a cabo su diseño y

su posterior acople a la estructura de seguimiento solar utilizando SketchUp como se ilustra en la Figura 12.

Figura 12.

Selección de sensor irradiancia solar- piranómetro DAVIS 6450.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el sensor Piranómetro Davis 6450, el diseño en SketchUp de la posición de instalación en un poste a 2 metros del seguidor solar y en la estructura del panel FV.

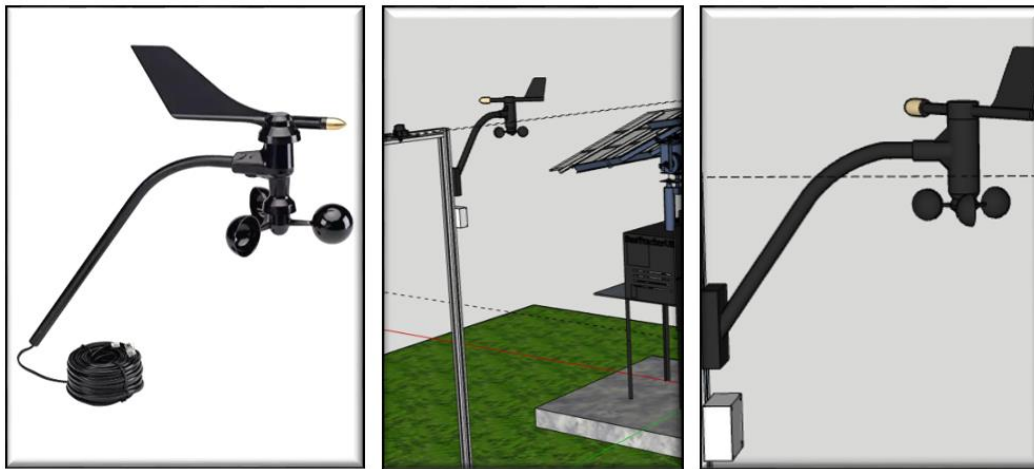
3.1.3 Anemómetro con veleta DAVIS 6410

Es un instrumento utilizado para medir la velocidad y dirección del viento en una ubicación específica. El anemómetro usa tres copas (cazoletas) que giran al viento y un mecanismo interno para medir la velocidad de rotación. La veleta tiene un diseño de flecha que puede girar libremente en función de la dirección del viento, mide la dirección del viento en grados en relación con el norte verdadero o magnético. Este dispositivo se conecta directamente al Arduino, usado como registrador de datos, en el cual recopilan y registran las lecturas del anemómetro y veleta para su análisis.

Este dispositivo estaba previamente instalado en un poste a dos metros del seguidor solar, pero no estaba conectado a un dispositivo de extracción de datos, lo que facilitó el cableado. Con el propósito de tener una referencia del lugar de instalación, se lleva a cabo el diseño de este en SketchUp, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13.

Selección de anemómetro con veleta Davis



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el sensor Anemómetro con Veleta Davis y el diseño en SketchUp de la posición de instalación en un poste a 2 metros del seguidor solar.

3.1.4 Sensor de temperatura termocupla DS18B20

El sensor DS18B20 posibilita la medición de temperaturas en un amplio rango, desde -55 °C hasta $+125$ °C (-67 °F a $+257$ °F). Este sensor se encuentra encapsulado en un tubo de acero inoxidable de 6 mm de diámetro por 30 mm de largo, lo que le otorga la capacidad de ser sumergido en líquidos o resguardado de las inclemencias climáticas, siendo una elección idónea para su implementación en el seguidor solar. Al tratarse de un sensor digital, la señal leída no se ve

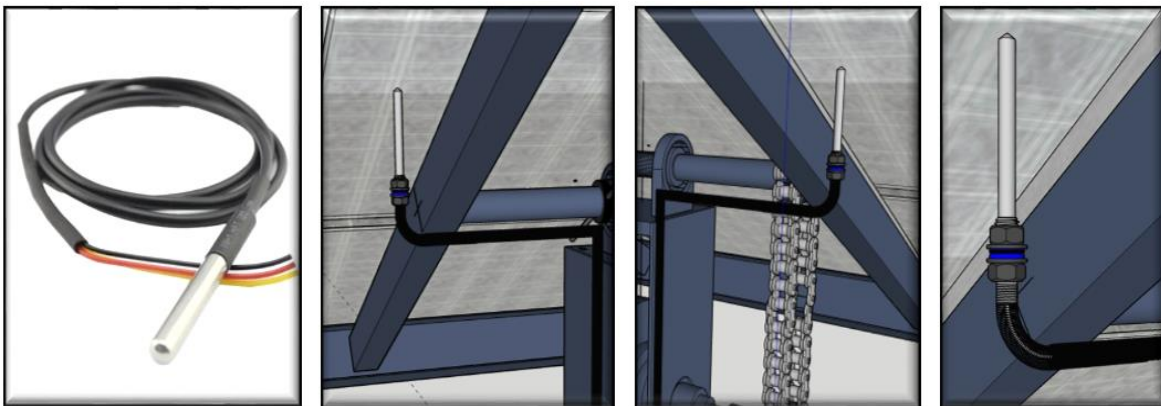
afectada por la distancia del cableado. Presenta una precisión de $\pm 0,5$ °C con una resolución de 12 bits, permitiendo una precisión detallada de hasta 0,0625 °C. Además, no demanda una calibración exhaustiva y suele proporcionar resultados estables y precisos.

Su elección de este sensor se fundamentó en su versatilidad, precisión y facilidad de uso gracias a su interfaz One-Wire. Además, su clasificación IP (*Ingress Protection*) 65, que indica su hermeticidad al polvo y protección contra agua proyectada según las especificaciones del fabricante, lo hace ideal para esta aplicación.

Se instalan tres sensores: dos para medir la temperatura en la parte posterior del panel FV y uno para medir la temperatura ambiente en el sitio. Para planificar la ubicación de estos sensores de temperatura, se realiza su diseño y se lleva a cabo su posterior montaje en la estructura de seguimiento solar utilizando SketchUp, tal como se muestra en la Figura 14.

Figura 14.

Selección de sensor de temperatura termocupla DS18B20.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el sensor de temperatura Termocupla DS18B20, el diseño en SketchUp para medir la temperatura de la parte posterior de panel FV y la temperatura del aire circundante.

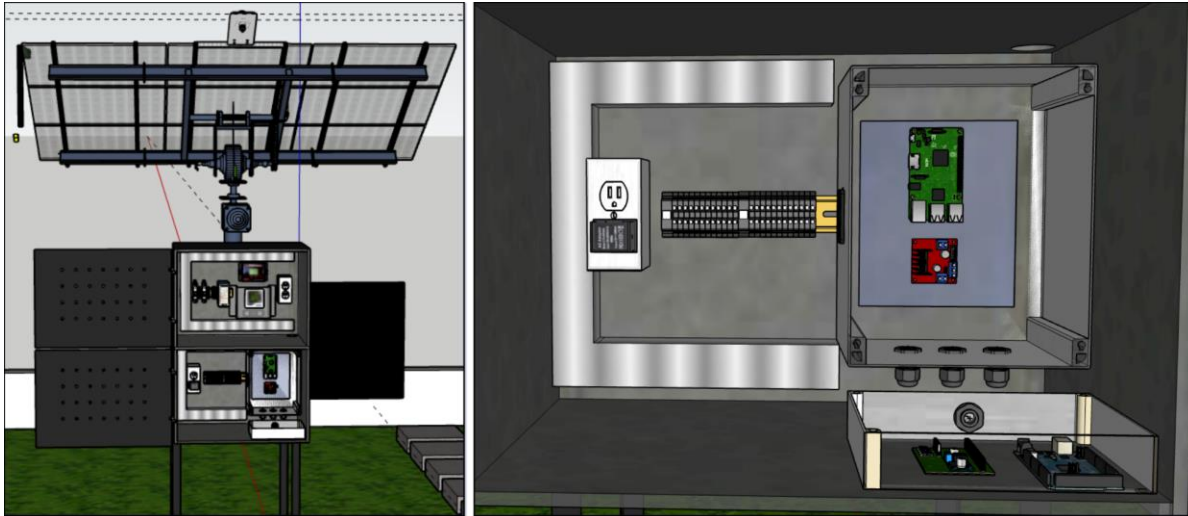
3.2 Selección de plataforma de control

Se optó por utilizar dos plataformas de control en el desarrollo del sistema de seguimiento solar: un Arduino Mega, que actúa como conversor AC/DC entre los sensores y el microcontrolador principal, y un microcontrolador principal Raspberry Pi 3b+, encargado del análisis, procesamiento de datos y control del sistema. Para lograr una comunicación efectiva entre ambas plataformas, se conectaron los dos equipos utilizando una conexión serie (*UART*) a través de un cable USB, lo que permite la transferencia bidireccional de datos y facilita la interacción y el control. Además, se incorpora un módulo DRIVER L298N que proporciona la capacidad de controlar la dirección de los motores de giro azimutal y de elevación, mejorando así la operación del seguidor solar.

La instalación de la plataforma de control se llevó a cabo en el gabinete inferior disponible en la estructura del seguidor solar. Su ubicación específica se planificó mediante la creación de un modelo en 3D utilizando el software SketchUp, como se muestra en la Figura 15.

Figura 15.

Diseño plataforma de control en SketchUp.



Nota. Las imágenes representan de izquierda a derecha el modelamiento de los gabinetes disponibles en el seguidor y el montaje de las plataformas de control (*Arduino Mega, Raspberry Pi 3b + y Driver L298N*).

3.2.1 Arduino Mega

Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560 como muestra la Figura 16. Se trata de una versión ampliada y mejorada del clásico Arduino Uno que ofrece una memoria flash de 256 kB, lo cual es suficiente para almacenar el programa que se ejecuta en el microcontrolador; además cuenta con cincuenta y cuatro (54) pines GPIO y dieciséis (16) pines de entrada analógica, entre otras características principales de uso común, que se detallan en la Tabla 1. Además, el Apéndice C presenta una comparación que justifica la selección de esta placa sobre otras alternativas como: *ARDUINO UNO, ARDUINO NANO, ESP 32 y MICROBIT*.

Figura 16.

Partes relevantes de Arduino Mega.

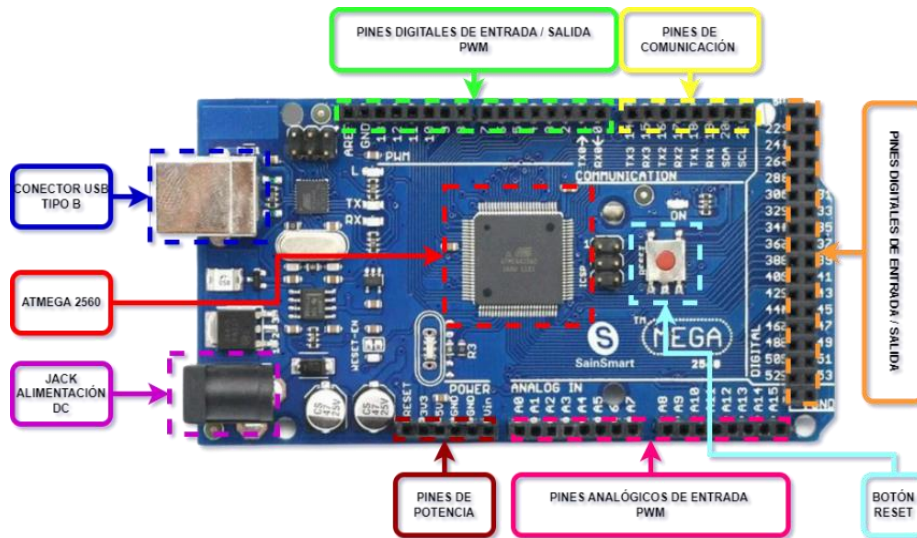


Tabla 1.

Características de ARDUINO MEGA.

Características ARDUINO MEGA		¿por qué se usó?
Microcontrolador	ATmega2560	Por su amplia cantidad de pines y recursos, resultó ideal para implementar múltiples instrumentos de medida con salidas analógicas. Además, su mayor capacidad de memoria es crucial para el almacenamiento y análisis de datos en el sistema de monitorización y registro de datos ambientales.
Velocidad de Reloj	16 MHz	
Memoria Flash	256 KB	
SRAM	8 KB	
EEPROM:	4 KB	
Pines de Entrada/Salida Digitales	54 (de los cuales 14 proporcionan PWM).	
Pines de Entrada Analógica	16	
Interfaces	UART, SPI, I2C	
Voltaje de Operación	5 V	
Corriente Máxima por Pin	40 mA	
Voltaje de Alimentación	7-12V (a través de la entrada Vin) o 5V (a través del conector USB).	
Tamaño:	101,5 mm x 53,3 mm.	
Conectividad USB	Mediante un conector USB-B.	
Programación	A través del IDE de Arduino utilizando un adaptador USB-Serial o directamente a través del USB incorporado.	

3.2.2 Raspberry Pi 3 B +

Tal como muestra la Figura 17, es una placa de computadora de una serie de dispositivos de bajo costo desarrollados por la Fundación Raspberry Pi. Esta placa es una versión mejorada de la Raspberry Pi 3 en términos de rendimiento, conectividad y características adicionales, tal como detalla la Tabla 2. Además, el Apéndice D presenta una comparación que respalda la selección de esta placa de desarrollo frente a otras opciones, como *RASPBERRY PI 4 B*, *NVIDIA JETSON NANO*, *BEAGLE BONE BLACK* e *INTEL EDISON*.

Figura 17.

Raspberry Pi 3 Modelo B +.

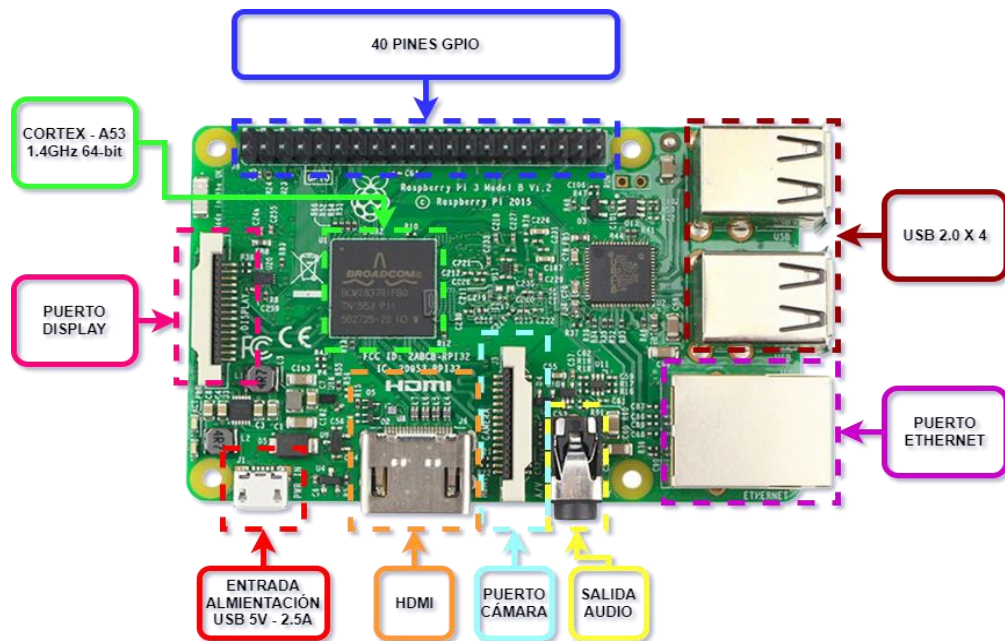


Tabla 2.*Características de Raspberry Pi 3 B +.*

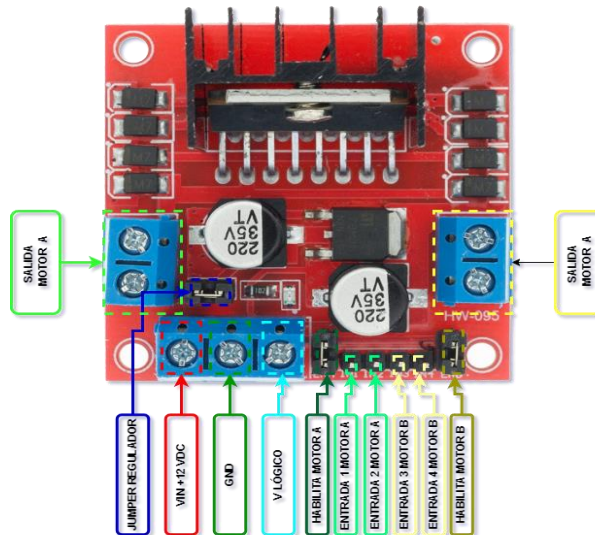
Características Raspberry PI 3 B+		¿Por qué se usó?
Microprocesador	Broadcom BCM2837B0, CPU ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos a 1.4 GHz	Su conectividad, potencia y facilidad de uso la hicieron perfecta para este proyecto. Se usó esta mini computadora para procesar datos recibidos desde el ARDUINO y controlar el movimiento azimutal y de elevación mediante el módulo L298N.
GPU	Video Core IV	
Memoria RAM	1 GB de LPDDR2	
Conectividad	Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 4.2, 4 Puerto USB 2.0, HDMI, GPIO.	
Almacenamiento	Tarjeta microSD	
Consumo de energía	2,5 W	
Sistema Operativo	Raspbian (basado en Linux)	
Puertos USB	4 x USB 2	
Puertos de Video	1 x HDMI	
Pines GPIO	40 pines GPIO	

3.2.3 Driver L298N

Es un dispositivo con un circuito integrado utilizado como controlador de motores en proyectos electrónicos y robóticos. Es especialmente útil para controlar motores de corriente continua y se utiliza ampliamente en aplicaciones que involucran movimientos, como robots, autos teledirigidos y sistemas de automatización. Se puede utilizar de manera efectiva para controlar los servomotorreductores y es mostrado por la Figura 18.

Figura 18.

Driver L298N.



Las características y el uso de este controlador se detallan en la Tabla 3. Además, el Apéndice E presenta una comparativa para justificar la selección de este controlador en lugar del L293D y el BTS7960, dos dispositivos similares pero cuyas características hacen que el L298N sea la opción más adecuada para el sistema.

Tabla 3.

Características de Driver L298N.

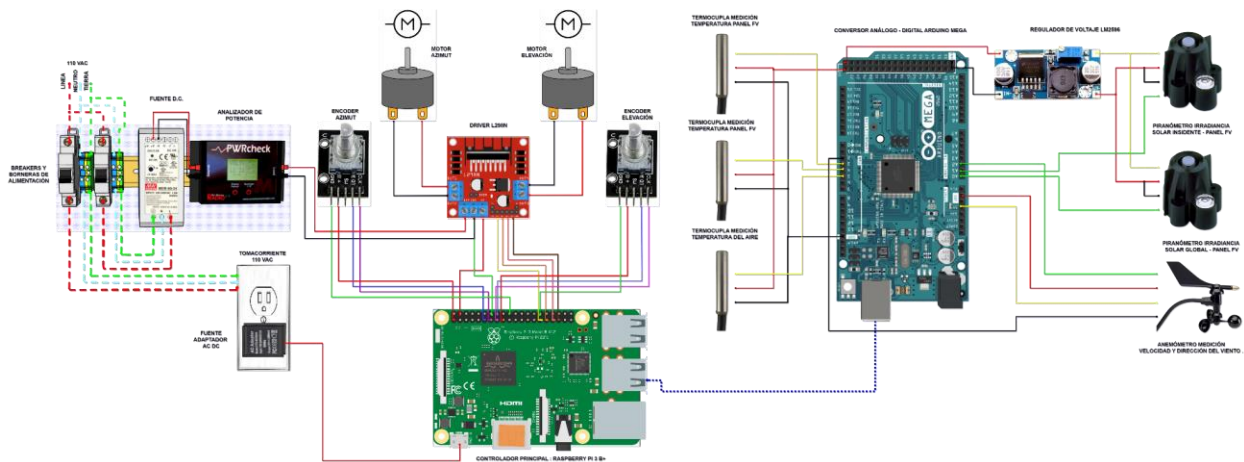
Características	L298N	¿Por qué se usó?
Tipo de motor	Controlador de motor DC (corriente continua) y motores paso a paso.	Este controlador de motores es asequible y versátil, y lo utilizamos en el proyecto para controlar los motores de azimut y elevación del seguidor solar, permitiendo un control preciso de su movimiento.
Corriente máxima por canal	Hasta 2 A por canal (hasta 4 A en picos) en el L298N.	
Canales	2 canales para controlar hasta 2 motores DC bidireccionales o 1 motor paso a paso bipolar.	
Tensión de alimentación	De 5 V a 35 V.	

Características	L298N	¿Por qué se usó?
Protección Térmica	Sí (apagado automático en caso de sobrecalentamiento).	
Control de sentido de giro	Sí	
Compatibilidad con Arduino y microcontroladores	Compatible con microcontroladores como Arduino.	
Modulación de Ancho de Pulso (PWM)	Sí	

Para lograr un diseño acorde con las especificaciones técnicas de cada componente seleccionado, incluyendo la alimentación AC y DC, sensores y plataforma de control, se elabora un diseño preliminar de conexiones que se ilustra en la Figura 19. También se elaboraron sus respectivos planos eléctricos, de comunicación y de control que detallan la ubicación de los componentes y sus conexiones, los cuales son mostrados en el Apéndice F.

Figura 19.

Diseño preliminar de conexiones del sistema.



4. Definición de la estrategia de monitorización de variables eléctricas, microclimáticas y operativas

La definición de la estrategia de monitorización se basó en un análisis de variables que priman al momento de diagnosticar el funcionamiento del seguidor; posteriormente, se eligieron los equipos para recopilar datos que deben ser tratados y analizados para inferir sobre la operación de todo el sistema.

Tabla 4.

Estrategia de monitorización.

Tipo de variable	Variable	Medición	Equipo Almacenamiento	Trasmisión	Tiempo Registro	Descarga/transmisión	Propósito general
Eléctrica	Tensión DC	PWR Check Ubicado en el gabinete posterior (entre fuente DC y Encoder)	PWR Check	NA	Instantáneo	NA	Consumo de los servomotores
	Corriente DC						
	Potencia DC						
	Potencia DC						
Eléctrica	Tensión DC	AcuDC serie 240 Ubicado en el gabinete posterior (entre el panel FV y microinversor)	AcuDC serie 240	NA	Instantáneo	NA	Medir la generación del panel FV
	Corriente DC						
	Potencia DC						
Microclimática	Tensión AC	EV390 Ubicado en el cuarto técnico del Piso 4	EV390	NA	1 minuto	NA	Inyección de potencia a la red eléctrica de BT
	Corriente AC						
	Potencia activa						
Microclimática	Potencia aparente	Piranómetro DAVIS 6450 1 Ubicado sobre la misma	Arduino MEGA	Raspberry PI 3+	1 minuto	5 minutos	Irradiación solar incidente sobre el panel FV
	Irradiancia solar						

Tipo de variable	Variable	Medición	Equipo Almacenamiento	Trasmisión	Registro	Tiempo Descarga/transmisión	Propósito general
		superficie de trabajo del panel FV					
	Irradiancia solar	Piranómetro DAVIS 6450 2 Ubicado a 2 metros de seguidor solar en posición horizontal			1 minuto	5 minutos	Irradiación solar incidente sobre el panel FV
	Velocidad del aire	Anemómetro DAVIS 6410 con veleta			1 minuto	5 minutos	Irradiación solar incidente sobre el panel FV
	Dirección del viento	Ubicado a 2 metros de seguidor solar			1 minuto	5 minutos	Irradiación solar incidente sobre el panel FV
	Temperatura del aire	Termocupla 3			1 minuto	5 minutos	Irradiación solar incidente sobre el panel FV
	Inclinación	NA	NA	NA	1 minuto	5 minutos	NA
	Orientación				1 minuto	5 minutos	NA
Operativa	Temperatura del panel FV	Termocupla 1 Termocupla 2 Ubicadas en la parte posterior del panel FV	Arduino MEGA	Raspberry PI 3+	1 minuto	5 minutos	Temperatura de operación del panel FV

4.1 Variables eléctricas

La Tabla 5 proporciona una descripción de la relación entre variables eléctricas, equipos, ubicación y características básicas de operación en el contexto del seguidor solar.

Tabla 5.

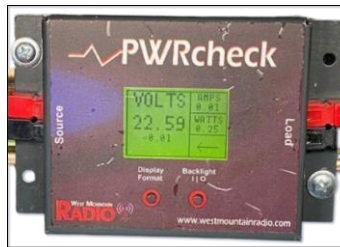
Relación entre variables eléctricas, equipos, datos de ubicación y operación.

Variable eléctrica	Equipos	Ubicación	Características básicas de operación
Tensión Corriente	PWRcheck	Conexión directa fuente 24 Vdc y servomotores	Medición de la tensión y corriente consumidas por los motores durante su funcionamiento y en reposo.
Potencia			Medición de potencia que se entrega a los servomotores por parte de la fuente de 24Vdc.
Tensión Corriente Potencia	AcuDC 240	Conexión directa al panel FV	Medición de tensión corriente y potencia que genera en DC el panel.
Potencia Factor de potencia Flujo de Potencia	Medidor EV390	Cuarto eléctrico (4to piso del edificio E3T)	Recopilación de valores eficaces de tensión y corriente, valores de potencia activa y potencia reactiva y factor de potencia. Estos datos ayudan a estimar la eficiencia de conversión del microinversor y cuantificar la inyección de potencia a la red eléctrica de baja tensión.

El equipo "PWR check" de West Mountain Radio, mostrado en la Figura 20, desempeña un papel esencial en el análisis de parámetros DC en la operación de los paneles FV; este medidor está conectado directamente entre la fuente de alimentación y el driver, lo que permite realizar la monitorización de los datos de tensión, corriente y potencia entregados por la fuente a los servomotores. La monitorización de los parámetros eléctricos arrojados por el "PWR check" puede ayudar a identificar posibles anomalías en el funcionamiento de los servomotores y la operación del seguidor solar.

Figura 20.

Medidor PWRcheck.



Adicionalmente, se cuenta con un medidor AcuDC serie 240 que se encarga de medir la operación de generación del panel FV en corriente continua (DC) antes de llegar al micro-inversor. Este dispositivo proporciona los valores de generación en tiempo real en lugar de generación, lo que permite un análisis más completo para posibles comparativas y su rendimiento.

Figura 21.

Medidor AcuDC serie 240.



El medidor EV390 de Accuenergy mostrado en la Figura 22 está ubicado en el tablero eléctrico del cuarto técnico del Piso 4 del Edificio de Ingeniería Eléctrica. También se caracteriza por realizar la medición de parámetros eléctricos como tensión eficaz, corriente eficaz, factor de

potencia, potencia activa, potencia aparente y potencia reactiva. Su conexión también se realiza de manera directa, entre el micro inversor y el punto de conexión común con red de baja tensión.

Figura 22.

Medidor EV390.



4.2 Variables microclimáticas

La Tabla 6 proporciona la relación entre variables micro climáticas (irradiación solar, velocidad y dirección del viento y la temperatura ambiente), equipos, ubicación y características básicas de operación. Destaca cómo diferentes variables microclimáticas como la están relacionadas con equipos específicos.

Tabla 6.

Relación entre variables microclimáticas, equipos, datos de ubicación y operación.

Variables	Equipos	Ubicación	Características básicas de operación
Irradiación solar	Piranómetro o DAVIS 6450	Ubicado en el panel FV y sobre	Permite cuantificar la irradiación solar incidente sobre el panel FV y global horizontal. Conexión a sistema basado en

Variables	Equipos	Ubicación	Características básicas de operación
		la azotea (junto al seguidor solar)	Arduino y Raspberry Pi para adquirir y procesar datos en tiempo real.
Velocidad de aire Dirección del viento	Anemómetro y veleta DAVIS	Ubicados en la azotea	Integrados con Arduino para recolección y procesamiento de datos.
Temperatura	Sensor DS18B20	Ubicado en el panel solar y entorno	Medición de la temperatura operativa del panel FV, lo cual ayuda a estudiar su eficiencia de conversión. Interacción con Arduino para conversión de datos analógicos a digitales. Transferencia de datos a Raspberry Pi para análisis y seguimiento.

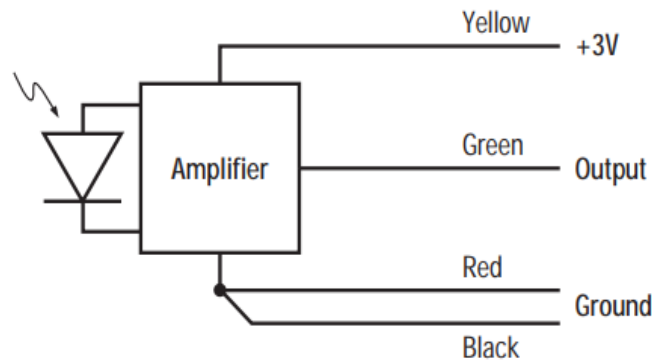
La medición de la irradiancia solar es esencial para un adecuado seguimiento del panel FV, ya que mediante la monitorización de esta variable se puede analizar la eficiencia y el rendimiento del seguidor solar.

La integración del piranómetro con un sistema basado en Arduino permite la adquisición de datos de irradiancia solar en tiempo real. Estos datos se transmiten a una Raspberry Pi que desempeña un papel central en la monitorización y procesamiento de la información, esta es la encargada de acoger los datos arrojados por el Arduino y llevarlos al aplicativo web para su visualización.

El método utilizado para la recolección de datos involucra la comunicación entre un Arduino y un piranómetro mediante un puerto RJ11 siguiendo el esquema de conexión proporcionado en el manual del piranómetro Davis, como se observa en la Figura 23.

Figura 23.

Esquema de conexión piranómetro DAVIS 6450.

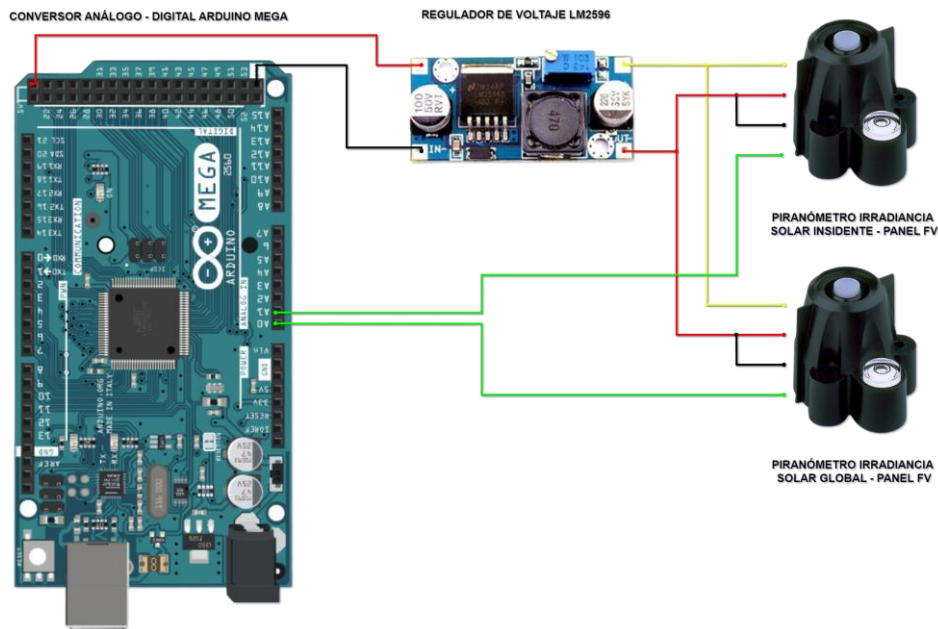


Nota: Adaptado de Davis Instruments, (2023) *Esquema de conexión Piranómetro*, https://www.meteo-system.com/davis/6450_spec.pdf

El cable de salida del puerto RJ11 se conecta al Arduino mediante el puerto analógico, lo cual permite medir la tensión de salida del piranómetro y, a su vez, realizar la conversión de señal analógica a datos de irradiancia solar. Si el sensor es alimentado a 3 Vdc, la salida arroja una tensión de 0 a 3 Vdc que equivale a una irradiancia de 0 a 1800 W/m²; por lo que, la conversión es realizada teniendo en cuenta que 1,67 mV equivale a 1,0 W/m².

Figura 24.

Esquema de conexión física de piranómetros a Arduino.

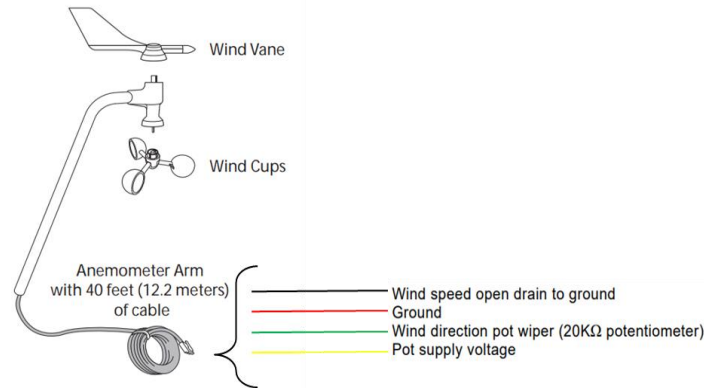


Nota: En la imagen se ilustra el diagrama de conexión y la relación específica de cada tipo de cable con el Arduino Mega.

La medición de variables como la velocidad y dirección del viento es esencial para asegurar el funcionamiento seguro y eficiente del seguidor solar, especialmente durante condiciones climáticas adversas como tormentas. Para llevar a cabo esta tarea, se emplea un sistema compuesto por un anemómetro y una veleta de la marca DAVIS conectados al Arduino Mega, lo cual garantiza la recopilación de datos procesamiento y visualización en tiempo real. Este dispositivo está dotado con un puerto RJ11 que está conectado al Arduino mediante el esquema de conexión que puede observarse en la Figura 25.

Figura 25.

Esquema de conexión anemómetro y veleta DAVIS 6410.



Nota: Adaptado de Davis Instruments, (2023), Specification sheets - Anemometer, https://www.davisinstruments.com/products/anemometer-for-vantage-pro2-vantage-pro?_pos=7&_sid=498c8ca2e&_ss=r

El sensor es alimentado a 5V DC y tiene dos salidas. La primera corresponde a la velocidad del aire (V) en función del número de pulso (P) en un periodo muestreo en segundos (T), cómo relaciona la Ecuación (1). Donde V es la velocidad en millas por hora o metros por segundo

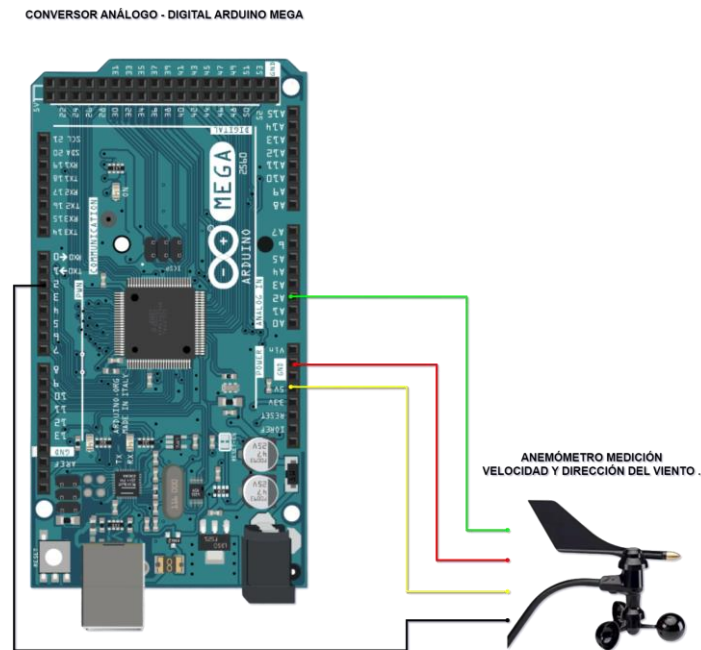
$$V = 2,25 \frac{P}{T} \left(\frac{mi}{h} \right) = 1,0 \frac{P}{T} (m/s) \quad \text{Ec. (1)}$$

La segunda corresponde a la dirección del viento a partir de una veleta compuesta por un potenciómetro de 20 kΩ, cuya conexión física puede observarse en la Figura 26. La Ecuación (2) muestra que una relación de 55,555 Ω por grado, siendo 10 kΩ equivalente a 180°, donde R es la resistencia medida y D la dirección del viento.

$$D = R/55,555 \text{ (}^\circ\text{)} \quad \text{Ec. (2)}$$

Figura 26.

Esquema de conexión física anemómetro Davis a Arduino.

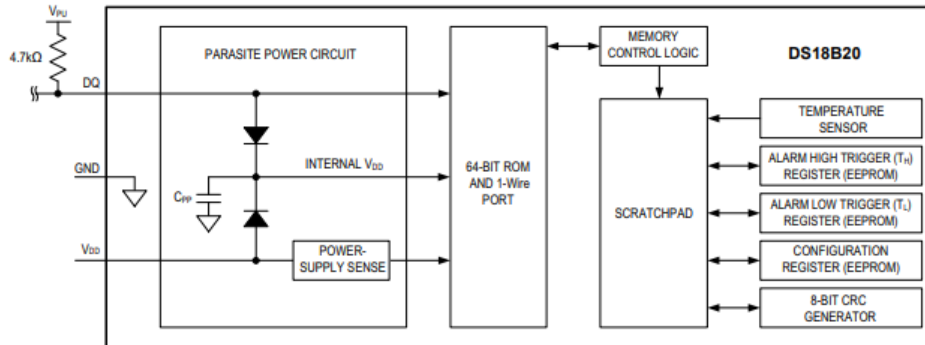


Nota: En la imagen se aprecia el diagrama de conexión del anemómetro y la relación específica de cada tipo de cable con el Arduino.

Con respecto a la temperatura de operación del panel FV, se tiene que su monitorización ayuda a caracterizar su operación. Para ello, se utiliza un sensor DS18B20, Este dispositivo tiene una dotación técnica y una complejidad que lo hacen ideal para realizar mediciones precisas. Para entender mejor su estructura, vamos a analizar la siguiente imagen que muestra su estructura.

Figura 27.

Diagrama de bloques del sensor DS18B20.

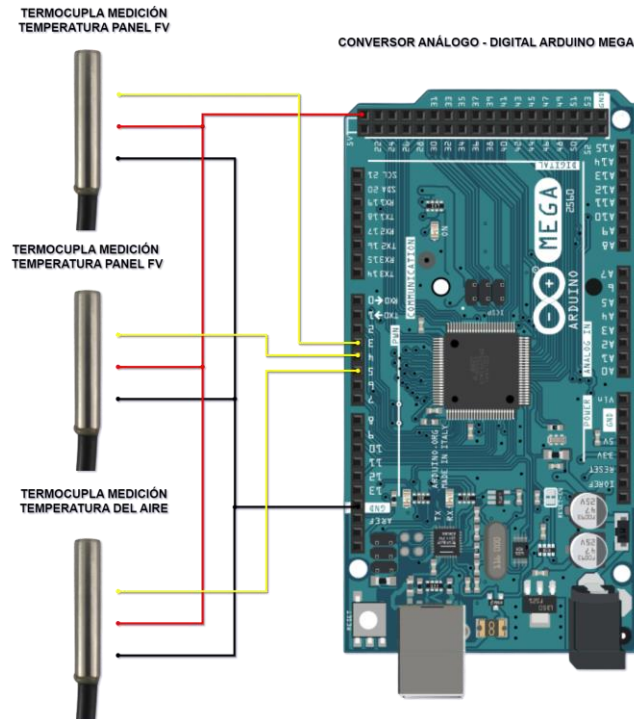


Nota: Tomado de DS18B20. (s. f.). <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>.

Para facilitar la conexión, se requiere un adaptador de terminal. Este circuito pequeño funciona como un divisor de tensión, lo que permite adaptar nuestro sensor de temperatura (termocupla) para conectarse fácilmente a Arduino. De esta manera, se proporciona una conexión más segura, evitando fallos por conexión.

Figura 28.

Esquema de conexión física termocuplas a arduino.



Nota: En la imagen se aprecia el diagrama de conexión de las DS18B20 y la relación específica de cada tipo de cable con el Arduino.

4.3 Variables operativas

La Tabla 7 describe brevemente las variables operativas, equipos, ubicación y operación, para gestionar aspectos como el ángulo de inclinación y orientación, la posición del seguidor, la corrección de errores y los límites de funcionamiento. Estos componentes propenden por asegurar el movimiento correcto del panel FV, la corrección de desviaciones y un funcionamiento seguro y duradero del sistema.

Tabla 7.

Relación entre variables operativas, equipos, datos de ubicación y operación.

Variables	Equipos	Ubicación	Características básicas de operación
Inclinación Orientación	Encoder Rotativo KY-040 Arduino - <i>Python</i>	Sistema de Seguimiento Solar	Utilización del Encoder Rotativo KY-040 para determinar con precisión los ángulos de giro e inclinación del panel solar. Interacción con Arduino y <i>Python</i> para traducir señales digitales en valores de ángulos y ajustar la orientación del panel.
Establecimiento de Límites y Umbrales	Dispositivo de umbral de movimiento		Creación de un dispositivo compuesto por un acople en el eje de elevación y un final de carrera. Establecimiento de ángulos de giro que respetan las limitaciones físicas para garantizar un funcionamiento seguro y prolongar la vida útil del sistema.

Para lograr la determinación de los ángulos y la orientación del sistema de seguimiento solar, se empleó un Encoder Rotativo KY-040, cuya función es proporcionar información sobre la posición angular del sistema al generar señales digitales que representan su movimiento rotativo.

Además, se implementó una estrategia que implica establecer rangos de valores para los Encoders, cuyas lecturas numéricas son interpretadas por *Python*. *Python* emite instrucciones para ajustar los servomotores, ajustando la orientación del panel solar para captar mayor cantidad de energía solar.

La definición correcta de los rangos de valores es esencial, ya que establece límites para el movimiento del seguidor solar. Esto asegura que el sistema se ajuste de manera inteligente en función de las lecturas de los Encoders, garantizando que el panel FV esté siempre orientado de manera correcta para aprovechar la irradiancia solar.

Para garantizar el seguimiento solar se recurre a *Python*, un lenguaje versátil de programación que facilita la comunicación con los Encoders y la interpretación de los ángulos capturados. Esto permite identificar y aplicar los ajustes necesarios en el sistema, lo que resulta

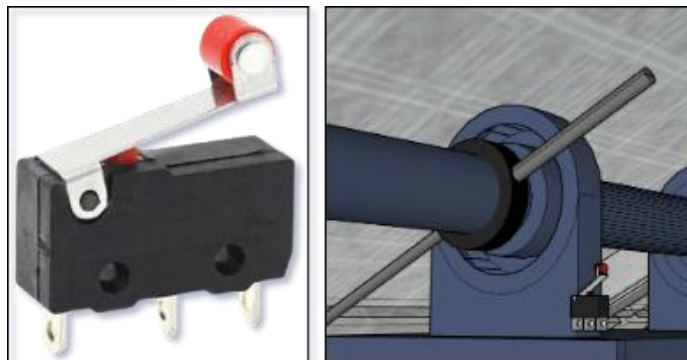
especialmente importante cuando factores externos como la fuerza del viento pueden perturbar la orientación del panel FV.

Además, se implementa una estrategia de monitorización que se enfoca en establecer límites operativos críticos para el seguidor solar. Se definen ángulos de giro que respetan las restricciones físicas, como los límites de cables y el umbral del servomotor de elevación. Esto garantiza que el panel FV no se desplace más allá de los límites seguros, evitando posibles daños permanentes debido a movimientos excesivos. Esta estrategia es esencial para salvaguardar la integridad y prolongar la vida útil del seguidor solar.

Para corregir la inclinación del panel FV y prevenir un exceso no deseado en dicha inclinación, se creó un dispositivo que consta de dos partes fundamentales. La primera comprende un acople en el eje de elevación que consiste en una barra paralela asociada al ángulo del panel FV. La segunda parte se trata de un final de carrera, dispositivo que interrumpe el movimiento del panel FV durante su elevación cuando es activado por el ángulo de inclinación permitido.

Figura 29.

Diseño de dispositivo que establece el umbral de movimiento.



Nota: La imagen representa el *microswitch* final de carrera, el diseño y ubicación en SketchUp, el cual mantiene el recorrido del panel FV dentro de los parámetros establecidos.

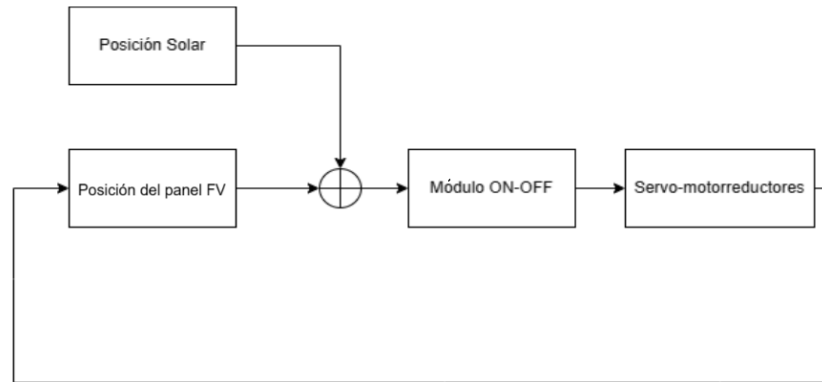
Este dispositivo está diseñado con la finalidad de evitar cualquier posible caída del panel FV más allá de los límites establecidos. Al evitar la posibilidad de que el panel FV se incline más allá de lo necesario, se reducen los riesgos asociados con movimientos excesivos y potenciales daños al equipo.

5. Implementación de la etapa de control y estrategia de monitorización

Para implementar la etapa de control del panel FV es necesario calcular tanto la posición solar (ideal) como su posición actual (real) en un sistema en lazo cerrado, con el fin de ajustar esta última en función del error existente entre ambas posiciones, tal como se muestra en la Figura 30. Se ha decidido emplear un sistema de control de posición angular para dar solución a este sistema, aprovechando los acoples de motores mencionados previamente en la Sección 2.1.2 lo cual nos permitirá identificar la posición “real” del panel FV en cualquier momento la cual se comparará con la posición del sol calculada mediante la librería PVlib, la cual se explica en la Sección 5.3.1.

Figura 30.

Sistema de control de seguidor solar en lazo cerrado.



5.1 Etapa de control

El algoritmo de control del seguidor solar mostrado por la Tabla 8 permite asegurar que el panel FV esté orientado hacia el sol durante la franja operativa definida (*principalmente 8 a.m. a 4 p.m.*), basado en cálculos de ubicación solar.

Tabla 8.

Algoritmo de control

Algoritmo	Características
Determinación de la posición solar	Se emplearon cálculos astronómicos utilizando modelos que se pueden ver en el Apéndice G.
Cálculo de la orientación deseada	Se calcula la posición que debe tomar el panel FV para apuntar hacia el sol.
Medición de la posición actual	Se utilizan encoders rotativos para determinar la posición actual del panel FV.
Cálculo del error de orientación	Calcula el error entre la orientación deseada calculada y la posición actual del panel FV. Esto nos da una medida de cuán lejos está el panel FV de la posición deseada.

Algoritmo	Características
Aplicación de la corrección	Ajusta el motor que controla la orientación del panel FV utilizando la corrección calculada en el paso anterior. Esto moverá el panel FV hacia la posición deseada.
Bucle continuo	El algoritmo se ejecuta en un bucle continuo todo el tiempo, donde las mediciones, cálculos y ajustes se realizan en intervalos realizados cada vez que la diferencia entre el panel FV y el sol sea 1 nivel o más, para mantener el panel solar orientado correctamente hacia el sol.

5.2 Limitación y seguridad

La seguridad es una prioridad al diseñar sistemas de seguimiento solar. Se evalúa situaciones de riesgo y aplicamos medidas de seguridad específicas, como limitaciones de movimiento, mecanismos de seguridad y protocolos de emergencia, para proteger tanto los paneles solares como el sistema en sí. La Tabla 9 relaciona consideraciones de limitación de movimiento, mecanismos de seguridad y protocolos de emergencia implementados.

Tabla 9.

Limitación y seguridad tomada en cuenta.

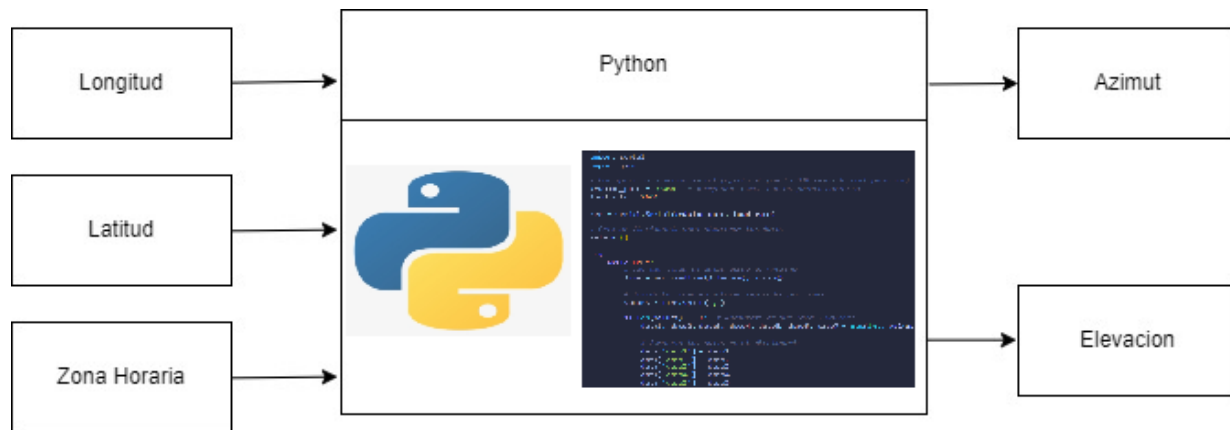
Límites de movimiento	<u>Limitación de ángulos:</u> Se establecen límites máximos y mínimos para los ángulos de orientación del panel FV, ya que éste en elevación sólo puede moverse entre ángulos de 30° a 90° con respecto al cenit por la propia limitación de la estructura metálica de soporte.	<u>Software de limitación:</u> En el software del controlador se implementa lógica que detiene los movimientos cuando se alcancen los límites predeterminados.
Mecanismos de seguridad	<u>Sistema de parada de emergencia:</u> Se incorpora un breaker como medio de desconexión, el cual funciona como parada de emergencia de acción manual ubicado en el cajón superior de la estructura metálica de soporte, con el fin	

	de desactivar el sistema de motores en caso de que se presente una situación peligrosa o de emergencia.	
Situaciones de emergencia	<u>Falla de energía:</u> En caso de falla de energía, el sistema se mantiene en la misma posición antes de la falla de energía y una vez regresa el fluido eléctrico éste reanuda su movimiento normal.	<u>Acceso remoto:</u> Se permite el acceso y control remoto para que el sistema (software) pueda ser detenido o ajustado desde una ubicación segura dentro de la universidad en caso de que se requiera u ocurra una emergencia.

5.3 Desarrollo del código y tecnología utilizada

Figura 31.

Funcionamiento del código.



La implementación de la etapa de control y estrategia de monitorización se fundamentó en la utilización de un algoritmo de programación diseñado utilizando el lenguaje de programación *Python*. La librería *PVLIB* fue una pieza esencial para el proyecto, permitiendo el cálculo de la posición solar en función de la ubicación geográfica y la fecha actual. Esta información se convirtió

en el núcleo de la estrategia de control, ya que proporcionó los datos necesarios para determinar la posición ideal del panel FV en todo momento.

El modelo *Ephem* usado por la librería *PVLIB*, más específicamente el modelo JPL DE432L, es un conjunto de ecuaciones matemáticas que se utilizan para describir con exactitud el movimiento de varios cuerpos celestes en el sistema solar, incluyendo el Sol, la Tierra y otros objetos importantes. Este modelo es desarrollado y mantenido por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, una institución reconocida por su experiencia en navegación espacial y ciencias planetarias.

La confiabilidad del modelo DE432L se debe en gran medida a su sólida base en datos de observaciones astronómicas de alta precisión.

Fuente: JPL Planetary and Lunar Ephemerides (nasa.gov)

Este se basa en las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones keplerianas: Estas ecuaciones describen el movimiento de los planetas alrededor del Sol.

Ecuaciones de nutación: Estas ecuaciones describen el movimiento de la Tierra alrededor de su eje.

Ecuaciones de precesión: Estas ecuaciones describen el movimiento de la Tierra alrededor del Sol.

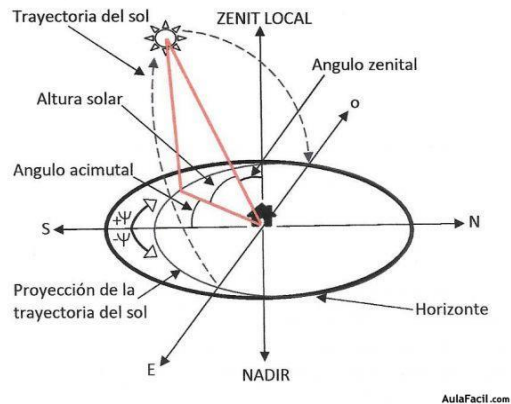
Estas ecuaciones son presentadas más a detalle en el anexo G. (Holmgren, Hansen, Mikofski. 2018).

Gracias a estos modelos matemáticos y a la biblioteca correspondiente es posible calcular todos los aspectos relacionados con la posición solar respecto a un observador en tierra. En este

proceso, se extraen el ángulo azimutal y el cenital, junto con su contraparte, la elevación solar para su utilización en el algoritmo de control.

Figura 32.

Posición solar respecto a un observador en tierra.

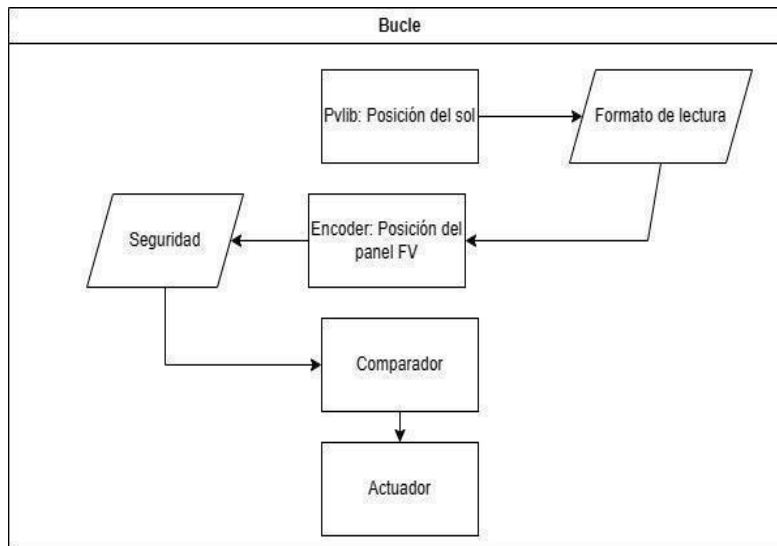


Nota. Tomado de: Rosar Trippi, R. D. (s.f.) Trayectoria del sol Aula Fácil <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-solar-fotovoltaica-1/trayectoria-del-sol-137869>

Ahora, se procede a explicar el código utilizado para el desarrollo e implementación del algoritmo de control. Este código es la columna vertebral del sistema. A lo largo de esta explicación, se abordan las funciones clave y la lógica detrás de cada paso del algoritmo, con el objetivo de proporcionar una visión completa de su funcionamiento y permitir a los desarrolladores y usuarios comprender su desempeño y posiblemente realizar mejoras según sea necesario.

Figura 33.

Diagrama de código para el control del seguidor solar.



5.3.1 Pvlib Posición solar

Para empezar a explicar cada paso del código, se recurre a la biblioteca Pvlib. Dentro de esta biblioteca, se utiliza una función personalizada, "*get_solarposition*". A esta función se ingresan los valores de latitud, longitud y zona horaria (7,14, -73,12 y GMT-5, respectivamente), que indican la ubicación geográfica del panel FV, así como su correspondiente zona horaria colombiana (Etc/GMT+5), con la cual internamente la librería obtiene la hora actual a través de internet. Utilizando esta información, se obtiene la posición exacta del sol con respecto al punto concreto en cuestión.

5.3.2 Formato

Es importante tener en cuenta que, en el modelo del sistema de control, los ángulos de posición solar y los valores enteros que representan la rotación angular del panel FV se obtienen mediante codificadores rotativos KY0-40. Como resultado, se tienen dos formatos distintos que no se pueden comparar directamente, por lo que se requiere una conversión para que sean directamente proporcionales. Se decidió utilizar el formato entero por su facilidad de manejo.

Al realizar un análisis de rotación del codificador, se determinó que el ángulo acimutal consta de 12 niveles medibles en el codificador, mientras que el ángulo de elevación sólo tiene tres niveles debido a la limitada rotación que ofrecen los acoplamientos de los potenciómetros de la estructura. En consecuencia, se utilizó una relación de 3:12 para convertir los 360° y 90° respectivos en niveles equivalentes. El proceso consistió en utilizar una función parte entera/piso para aproximar los valores intermedios dando los siguientes resultados notados en las tablas 10 y 11.

Tabla 10.

Conversión ángulo azimutal

Desde	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Hasta	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
Nivel	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Tabla 11.

Conversión ángulo cenital

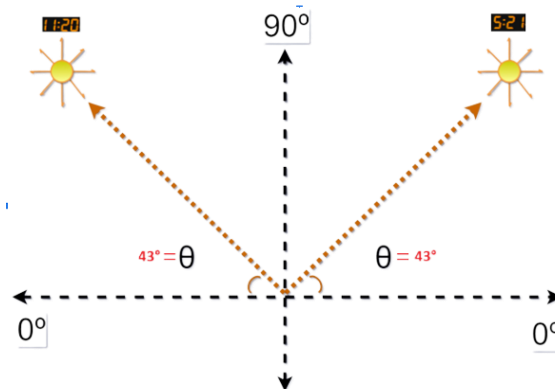
Desde	30°	60°	90°
Hasta	60°	90°	
Nivel	0	1	2

Nota: La representación gráfica de esta conversión puede verse en la Capítulo 7, Figura 42.

Hay varias características únicas a destacar en la Tabla 11, como el hecho de que el ángulo de elevación va de 0° a 90° (NO confundir ángulos solares con inclinación del panel FV) en lugar de 0° a 180°. Esto se debe a que, gracias a la rotación azimutal de 360° del panel FV, el hemisferio frontal del panel siempre estará orientado hacia el sol. Por tanto, sólo se necesitan 90° de rotación. Una vez que el sol pase su ángulo máximo (90°) del día, el ángulo de elevación empezará a disminuir de 90° hasta que se ponga por debajo del horizonte.

Figura 34.

Repetición ángulo de elevación.



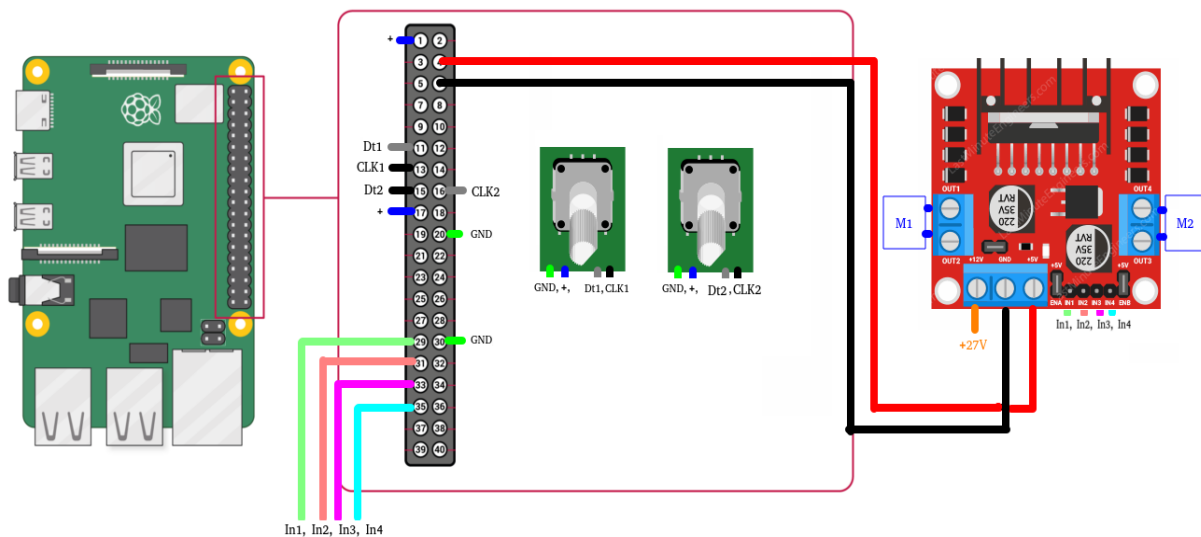
Otra observación se refiere al segundo nivel de conversión, que se añadió para incluir el ángulo de 90°, ya que los intervalos no incluyen el punto final superior; entonces se designó un nivel para ello debido a la exactitud del codificador.

5.3.3 Encoders posición del panel FV

Para obtener la posición desde los encoders KY-040 conectados a la Raspberry Pi 3, implementamos un código de lectura en modo contador. Esto significa que cada tick de movimiento rotatorio que se le dé al Encoder aumenta en uno el contador y cada tick en sentido antihorario disminuye el contador. Esta acción permitió establecer el rango de niveles de movimiento del panel FV, como se explicó en el numeral anterior, y extraerlo en cualquier momento, siguiendo el formato establecido.

Figura 35.

Diagrama de conexiones para el algoritmo de control.



5.3.4 Seguridad

Tras recoger y convertir los datos de la posición solar y del panel FV, se integraron en el código ciertas medidas de seguridad para evitar que el panel se moviera de forma errática debido a errores. Se tuvieron en cuenta las limitaciones de movimiento dentro de los niveles previamente definidos, así como la señal analógica del interruptor de fin de carrera comentada en el Numeral 4.3. Esto detiene el panel durante la elevación y envía una señal de alerta a través de la aplicación web. Estas son solo pequeñas ayudas de software que ayudarán a prevenir fallas.

5.3.5 Comparador

Durante esta etapa, se utilizan los valores de posición solar (azimut y elevación) y se han comparado con los valores de **elevación** y **azimut** del panel FV, denominados **panelAzimuth** y **panelElevacion**. En esta sección del código, la atención se centra en calcular el error y, a continuación, transmitir las señales al módulo de control del motor las cuales son señales digitales altas o bajas. Teniendo en cuenta que los valores de posición -o niveles- están en las mismas unidades gracias al formato (Numeral 5.3.2), se puede hacer una comparación directa para calcular el error; si el panel FV está colocado a 4 y el sol se mueve a 5, el error es 1. A través de dos salidas digitales, una salida alta y otra baja, se indica el movimiento en el sentido de las agujas del reloj, como se explica en el Numeral 5.3.6. Una vez que el panel FV se encuentre en la posición 5, se envían dos salidas digitales bajas para detener el motor, permitiendo finalmente que el panel FV apunte hacia el sol. Este proceso recurrente se repite en bucle, también para el ángulo de elevación, donde los ajustes se realizan en intervalos. Esto sucede cada vez que la diferencia entre el panel

FV y el sol sea de 1 nivel o más, con el propósito de mantener el panel solar correctamente orientado hacia el sol.

5.3.6 Actuador

Para indicar la lógica de las entradas digitales se debe ver cómo funcionan a detalle las entradas digitales del módulo L298N, mostrado en la Figura 37. Como se observa son cuatro entradas digitales encargadas de invertir el sentido de giro de los motores. In1 e In2 controlan la inversión del motor de azimut, mientras que In3 e In4 controlan la inversión del motor de elevación. Estas entradas también proporcionan la capacidad de apagar cada motor. La Tabla 12 representa el funcionamiento de cada par de entradas.

Figura 36.

Entradas digitales módulo L298N

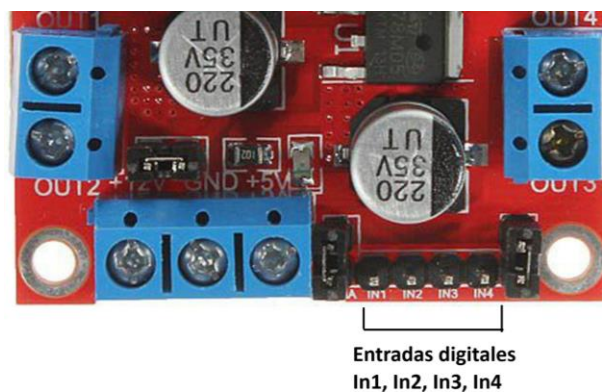


Tabla 12.*Relación entradas-giro*

Entradas	Alto + Bajo	Bajo + Alto	Bajo + Bajo
Giro	Horario	Anti-Horario	Apagado

6. Creación de aplicativo online para la visualización de variables monitorizadas

Iniciando desde una página web alojada en Google Sites, la cual que se puede ver en la Figura 38, se encuentra la información del proyecto, incluyendo los archivos relacionados al proyecto como los códigos y diagramas. Además, en la parte superior de la página, hay un banner de tipo botón llamado "Monitorización", el cual permite acceder al aplicativo web que muestra las variables relacionadas con el proyecto si se está conectado a la red "comunidad_UIS" dentro de la universidad,

Figura 37.*Sitio web de Google.*

La aplicación web funciona como una página web que utiliza un servidor⁷ Apache para alojar un servidor local que muestra variables asociadas al panel FV, como lo son las variables de microclima descritas en el Capítulo 4 y las variables energéticas medidas por el EV390. Estas variables incluyen tres lecturas de las Termocuplas DS18B20, dos de ellas para el panel FV y la faltante para la temperatura del aire circundante de éste, dos piranómetros que miden la irradiancia solar incidente tanto en el panel FV como en una superficie horizontal, como muestra la Figura 12, un anemómetro con una veleta para identificar la velocidad y dirección del viento. El EV390 proporciona variables respectivas a la producción del panel FV como lo son voltaje de línea y fase,

⁷Apache es un servidor web gratuito y de código abierto. Es un servidor robusto y fiable que puede soportar una gran carga de trabajo, es fácil de mantener, pero aun así es importante realizar tareas de mantenimiento periódicas. Apache es conocido por su estabilidad y confiabilidad, abundante documentación y recursos disponibles por lo cual no se tendrá muchos problemas con el mantenimiento respectivo.

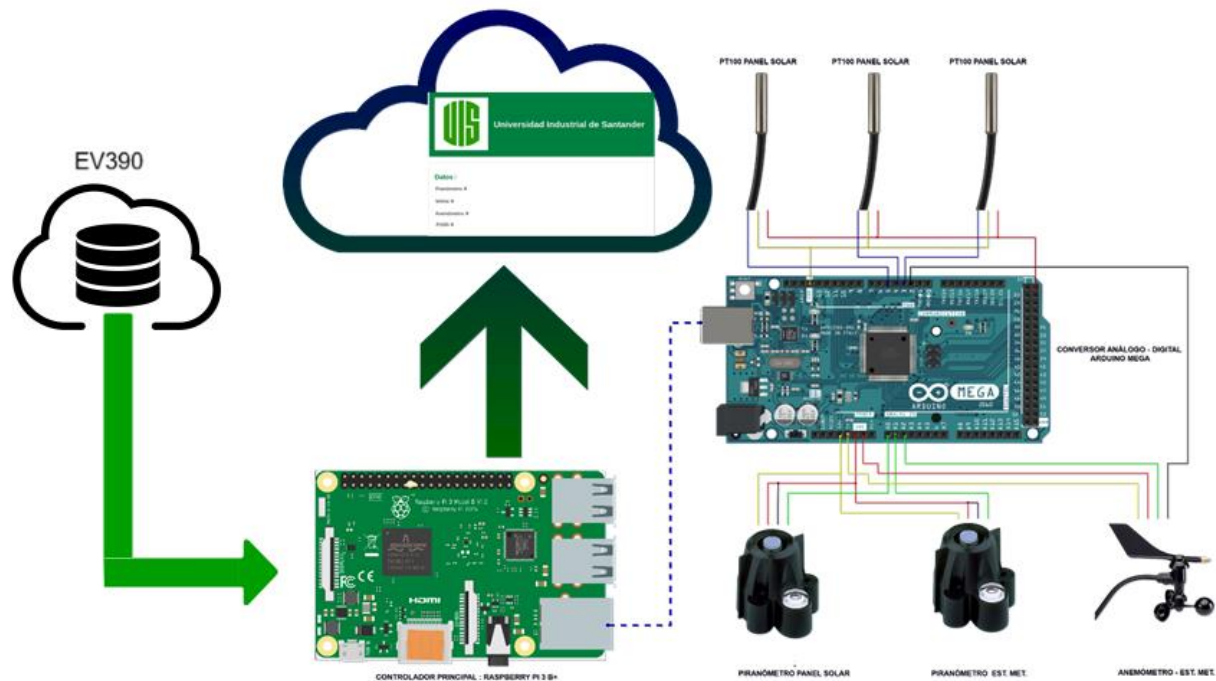
corriente, potencia, frecuencia y sus respectivos promedios como se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13.

Variables del medidor Ev390.

Variables EV390	Tensión de fase U1	Tensión de línea U12	Corriente I1	Corriente neutra In
	Tensión de fase U2	Tensión de línea U23	Corriente I2	Potencia P
	Tensión de fase U3	Tensión de línea U31	Corriente I3	Potencia aparente S
	Tensión promedio de fase Uavg	Tensión promedio de línea Uavg	Corriente promedio Iavg	Potencia reactiva Q
	Carga natural RT	Frecuencia F	Factor de potencia PF	_____

Además, el aplicativo web incluye el valor del ángulo en tiempo real del sol tanto en azimut como en elevación. La Figura 39 ilustra los sensores conectados en el diagrama del servidor que se apoya en la Raspberry Pi 3 y se conecta directamente a la red de la universidad.

Figura 38.*Esquema I/O del aplicativo web.*

Un Arduino MEGA se encarga de la recopilación de datos, ya que la Raspberry Pi carece de suficientes entradas analógicas para esta tarea. Los datos recopilados son transmitidos a través del puerto serial ACM0, el cual es el puerto por defecto a la Raspberry Pi, y se almacenan en un archivo con formato JSON utilizando un código en lenguaje Python que se encarga de recibir datos tanto del arduino como de la base de datos con la que cuenta el EV390, además de calcular la posición del sol con la librería PVLIB como se mostró en la Sección 5. Este archivo JSON incluye las variables y puede ser leído mediante código HTML, lo que posibilita su visualización en un sitio web alojado en el servidor Apache.

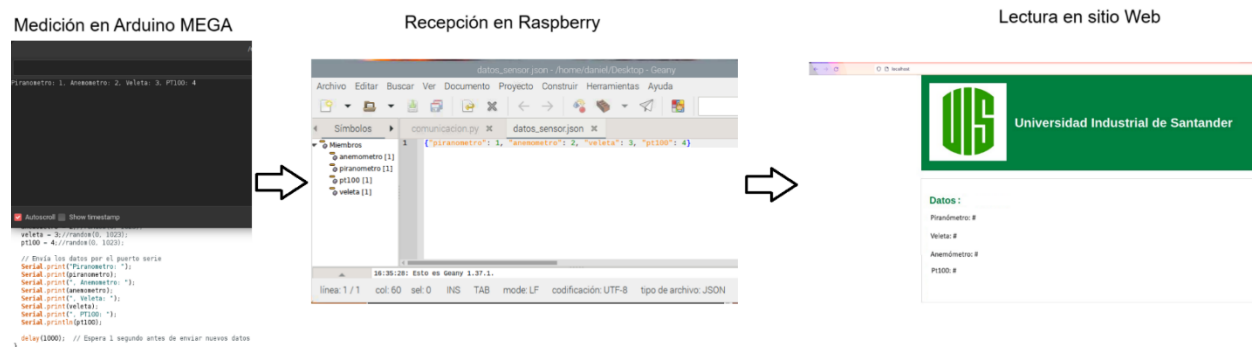
En la configuración del servidor se instaló el servidor web Apache en la Raspberry Pi o en el servidor local denominado "comunidad UIS", permitiendo así que el sistema pueda servir páginas web; posteriormente, se definieron las rutas del archivo JSON para garantizar una correcta

lectura de los datos. Es importante tener en cuenta que los datos se actualizan constantemente en tiempo real; sin embargo, la página web necesita ser recargada para mostrar la información más reciente.

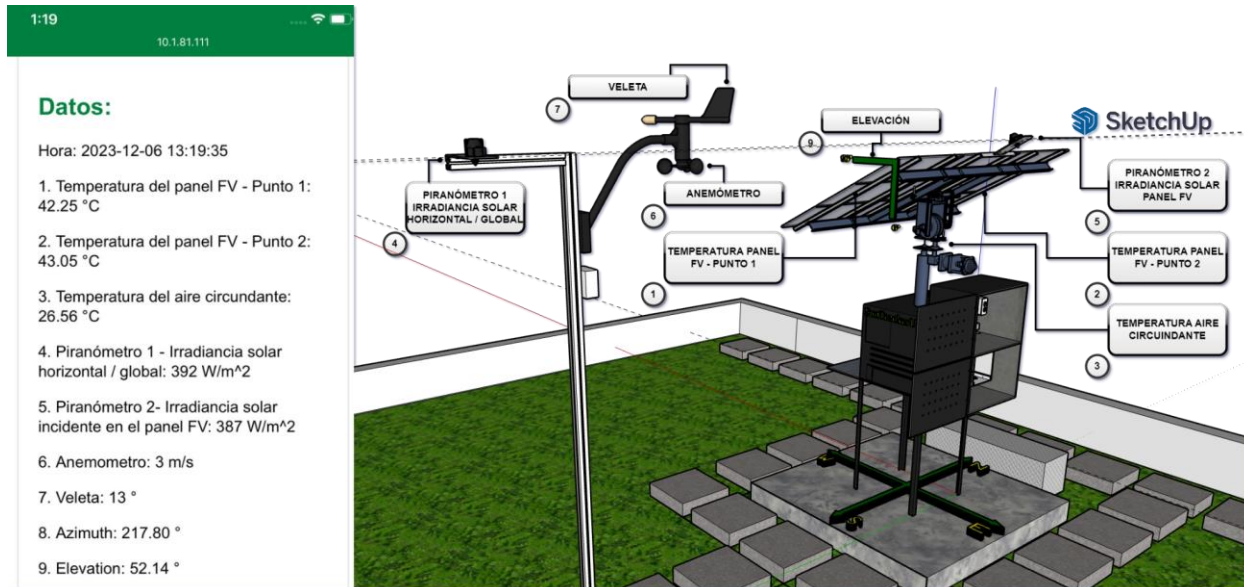
El aplicativo web permite la visualización y descarga de los datos. Se ha creado una base de datos en formato Excel que guarda los datos cada minuto; Cada vez que el se reinicia el código de recepción de datos este creara un nuevo archivo cuyo nombre es la fecha de ese momento y se guardara dentro de un archivo zip comprimido junto a todos los archivos creados para su posterior descarga. Para descargar este archivo de base de datos, se debe hacer clic en el botón que se encuentra en la página web llamado “descargar Excel” ubicado al final de la página, y el archivo se descarga automáticamente.

Figura 39.

Paso a paso publicación de variables medidas.



Para el diseño de la página web, se desarrolló una interfaz sencilla y fácil de usar que muestra los datos en formato de lista para un acceso rápido y sin esfuerzo. Además, se agregó una imagen que guía al usuario del aplicativo para identificar a cuál sensor corresponde cada variable y su ubicación, como se puede observar en la Figura 40.

Figura 40.*Interfaz web*

7. Pruebas al seguidor solar y valoración de operación

Este capítulo presenta la planificación y los resultados de las pruebas realizadas al seguidor solar, así como la valoración de su operación. Las pruebas abarcan una serie de análisis, incluyendo la evaluación del seguimiento solar, tanto en azimuth como en cenit, monitorización de variables eléctricas, microclimáticas y operativas asociadas al seguidor solar. A partir de los datos recopilados y los resultados obtenidos, se lleva a cabo una valoración integral, identificando áreas de correcto desempeño y áreas que requieren mejoras. Con base en estos hallazgos, se proporcionan recomendaciones específicas sobre la operación, para prolongar la vida útil del seguidor solar, garantizando así un desempeño confiable en el futuro.

La Figura 42 ilustra los posibles movimientos del seguidor solar, donde el ángulo de azimut puede variar de 0 a 360 °, y el ángulo de cenital puede oscilar entre 30 y 90 °. Por lo tanto, en la creación del código del programa de control, se realiza una conversión lineal del azimut dividido en doce niveles y el cenit en tres niveles; esto se explica con más detalle en la Sección 5.2. Además, para garantizar una conversión adecuada de las medidas de grados actuales a niveles actuales en los dos grados de libertad del seguidor, se notan las siguientes fórmulas, en donde el resultado de calcular el nivel de posición actual se aproxima a una unidad menor.

Conversión de grados de azimut :

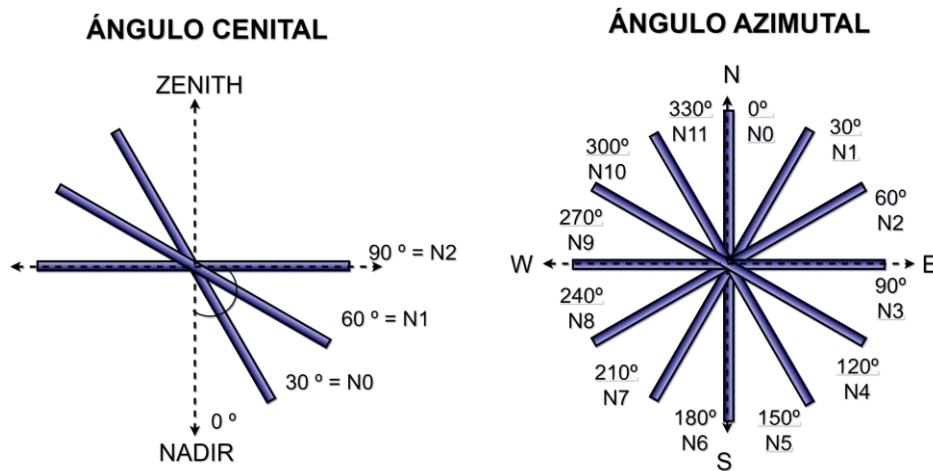
$$NAz = GAz * \frac{12}{360}$$

En donde NAz son niveles actuales de azimut y GAz son los grados actuales de azimut

Conversión de grados del cenit:

$$NAce = GAce * \frac{3}{90}$$

En donde NAce son niveles actuales de cenit y GAce son los grados actuales de cenit.

Figura 41.*Movimiento cenital y azimutal para el seguidor solar*

Nota: En la figura se ilustra el movimiento de elevación y azimut del seguidor siendo N# el nivel al cual corresponde el grado angular de rotación, el cual varía cada 30 grados en los dos casos.

7.1 Planificación pruebas a seguidor solar

Para valorar el seguidor solar, se lleva a cabo una planificación previa que contempla la descripción de pruebas a realizar, metodología de ejecución, período de verificación y criterios para evaluar su calidad de desempeño.

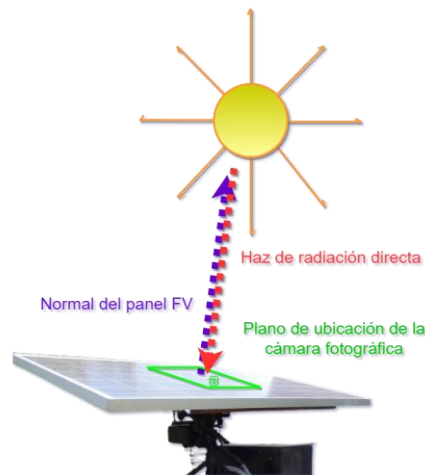
7.1.1 Evaluación de movimiento azimutal y cenital

Para registrar la posición efectiva del panel FV y garantizar el óptimo funcionamiento con respecto al movimiento del sol, se lleva a cabo un análisis del movimiento del seguidor solar, desarrollándose en tres etapas.

Etapa 1: Se capturaron imágenes de la bóveda celeste, con intervalos de una hora entre muestra, las cuales se registran en Tabla 18. En este proceso, se dispone una cámara fotográfica en un plano perpendicular a la norma del panel FV, tal como se muestra en la Figura 42.

Figura 42.

Ubicación de la cámara para tomar registro fotográfico de la bóveda celeste.



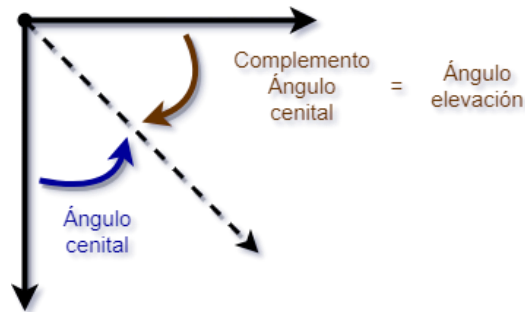
Etapa 2: Se llevaron a cabo pruebas de movimiento azimutal. El seguidor solar ajusta el panel FV para seguir la trayectoria aparente del sol, considerando mediciones en doce niveles de rotación.

Etapa 3: Se llevaron a cabo pruebas de movimiento cenital, centradas en el seguimiento vertical del sol en diferentes condiciones de elevación solar, considerando mediciones en tres niveles de rotación.

Con el fin de simplificar el registro del movimiento del ángulo cenital, se emplea su complemento, es decir, el ángulo de elevación como se muestra en la Figura 43. Esto permite una comparación más sencilla entre los valores experimentales y los valores reales, para este caso.

Figura 43.

Complemento de ángulo cenital.



En las dos etapas finales, se efectuaron mediciones de ángulos de seguimiento y se registraron los errores angulares en comparación con la posición solar real. Estas mediciones se realizaron durante un período que abarcó desde las 8:00 a. m. hasta las 4:00 p. m., con un intervalo de 15 minutos entre cada medición. Todos los datos se registraron en el Apéndice K.

Para lograrlo, se llevó a cabo una comparación de las mediciones de ángulo azimutal y cenital que incluyen dos aplicaciones móviles *ANGLE METER* y *SUN LOCATOR*, además del programa de control, que imprime la posición actual del seguidor solar. en la Tabla 14. Se nota el procedimiento de comparación y toma de datos de movimiento.

Tabla 14.

Procedimiento de comparación y toma de datos de movimiento.

Hora	Sun Locator[°]		Angle Meter [°]		Seguidor Solar[°]	
	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación
10:00 am a 04:00 pm cada 15 min	Indica altura y azimut del sol con respecto a la ubicación geográfica del seguidor solar en grados sexagesimales.		Mide directamente los ángulos de elevación y azimut sobre la superficie del panel FV		Imprime formato txt, con información de azimut y elevación en niveles los cuales corresponden a un	

Hora	Sun Locator[°]		Angle Meter [°]		Seguidor Solar[°]	
	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación
			en	grados	ángulo en específico, según Figura 42.	
			sexagesimales.			

El criterio para evaluar la calidad del rendimiento en esta etapa se centró en mantener el error angular máximo por debajo de 30 grados por nivel en todo momento. Además, durante este periodo, se evaluó el porcentaje de error de la alineación del seguidor con respecto a la posición real del sol.

7.1.2 Planificación monitorización de variables microclimáticas

Para llevar a cabo la monitorización de variables microclimáticas, se inicia con la identificación de las variables que se miden directamente en el emplazamiento del seguidor solar. Estas variables incluyen la temperatura ambiente, la temperatura en la parte posterior del panel FV, la velocidad y dirección del viento, así como la irradiancia solar horizontal e incidente en el panel FV.

La recopilación de esta información se realiza como se indica en el Capítulo 6, se almacena y transmite para ser visualizada en un sitio *web* alojado en el servidor Apache en tiempo real.

Como parte de la estrategia, en la Figura 44, se puede observar un código QR que proporciona un enlace a una página web (Google Sites) con el objetivo de brindar un entorno interactivo. Desde esta página, se puede acceder para conocer las variables microclimáticas en tiempo real.

Figura 44.

Código QR para acceder al sitio web



Nota: Código QR para visualizar el sitio web (Solo se puede acceder desde la red COMUNIDADUIS en el campus principal de la Universidad Industrial de Santander) donde se encuentra información directa de las variables microclimáticas del seguidor solar.

Además, para ingresar de manera más sencilla, se puede escribir “10.1.81.111” en el navegador personal. Esto lo lleva automáticamente al sitio encargado de mostrar las variables, en donde se encuentra un botón de descarga de los datos de variables microclimáticas y de operación.

7.1.3 Planificación valoración de variables microclimáticas

Con el propósito de valorar la operación y corroborar el funcionamiento de los equipos usados para obtener las variables microclimáticas, se planifica el uso de diferentes herramientas e instrumentos de medición comparativa y pruebas que brindan mayor soporte al momento de verificar los resultados obtenidos; esto descrito en la Tabla 15.

Tabla 15.*Herramientas de medición y comparación.*

Punto de medición		Pruebas y valoración	
Instrumento	Medida	Tipo de medición	Herramienta de comparación
Termocupla 1	Temperatura posterior panel FV	Monitor serial de Arduino	Termómetro por infrarrojo Fluke 561
Termocupla 2	Temperatura posterior panel FV		
Termocupla 3	Temperatura ambiente		
Piranómetro 1	Irradiancia solar global / horizontal		Obstrucción de irradiancia
Piranómetro 2	Irradiancia sobre panel FV		
Veleta	Dirección del viento		Pinza amperimétrica RMS Fluke 325
Anemómetro	Velocidad del viento		Termo-Anemómetro Exttech AN100 CFM/CMM

7.1.4 Planificación monitorización y evaluación de variables eléctricas

Durante las pruebas del sistema de monitorización, se determinan las variables eléctricas críticas necesarias para el funcionamiento del sistema de seguimiento solar. Estas variables abarcan la medición del consumo y la generación de voltaje, corriente y potencia. Para obtener estas mediciones, se emplean cálculos basados en estimaciones de consumo proporcionadas en las hojas de datos de los instrumentos de medición y control y se utilizan equipos de medición para los actuadores y la instalación eléctrica ubicada aguas abajo del panel FV, tal como se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16.

Etapas y métodos de medición de consumo y generación de energía.

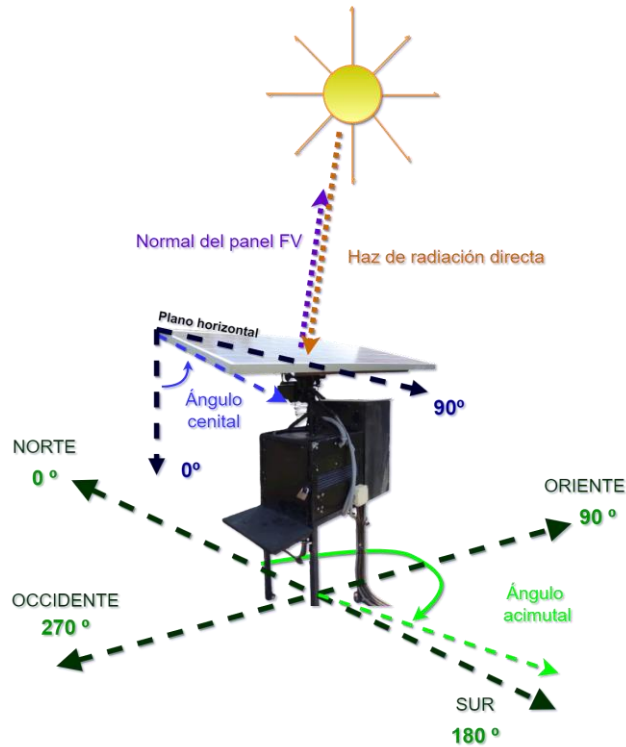
Etapa	Punto de medición	Método de medición
1	Arduino Mega	Estimación de consumo de energía en dispositivos de control e instrumentación electrónica por hoja de datos y horas de operación
	Raspberry PI 3+	
	Anemómetro y veleta DAVIS	
	Encoder KY-040	
	Piranómetros	
2	Termocuplas	Medición de consumo de energía por medio de PWR CHECK, con recopilación de datos operativos en un día de trabajo, desde las 8:00 a. m. hasta las 4:00 p. m.
	Servomotores	
3	Panel FV	Monitorización de medición de generación de energía del panel FV mediante medidor de energía y potencia de CC AcuDc serie 240.
4	Microinversor	Monitorización de medición de generación de energía del panel FV mediante medidor de energía y potencia de CA EV 390

7.2 Calibración inicial del seguidor solar

Antes de iniciar operación en el seguidor solar, se verifica la posición actual del panel FV, si este no está alineado de forma perpendicular a los haces de radiación directa del sol, se lleva a cabo la calibración de su posición en relación con la posición del sol, tal como se ilustra en la Figura 45. Esto es esencial para garantizar que el programa, al iniciar su operación, cuente con un margen mínimo de error en la retroalimentación de los movimientos del seguidor solar. Se recomienda llevar a cabo esta alineación antes de iniciar la operación en un estado de reinicio de las tarjetas de control o después de un corte prolongado de suministro de energía del sistema.

Figura 45.

Calibración del seguidor solar con respecto a la posición del sol.



Nota: En la figura se ilustra la superficie del panel con un ángulo de elevación y azimut que coincide con la posición actual del sol, a este sistema se le considera calibrado para su operación.

7.2.1 Verificación posición actual de panel FV

Se verifica la posición actual del panel FV utilizando la aplicación móvil *ANGLE METER*. Esta aplicación se encarga de medir directamente los ángulos de elevación y azimut sobre la superficie del panel FV. Con la cámara del teléfono móvil se enfoca de manera que la aplicación esté alineada con la superficie del panel FV como se muestra en la Figura 46. Luego, se registran y observan los valores de ángulo de elevación y azimut en la aplicación. Estos valores medidos en

la aplicación se utilizan para realimentar el programa y calibrar en la posición óptima con respecto al sol, antes de iniciar la operación.

Figura 46.

Interfaz aplicación ANGLE METER



Nota: En la interfaz de *ANGLE METER* indica una rotación de 30 grados con respecto a la horizontal.

7.2.2 Verificación de posición solar

Se verifica el azimut y la altura solar utilizando la aplicación *SUN LOCATOR*, una herramienta versátil que proporciona información sobre la posición del sol en el cielo y su trayectoria a lo largo del día en relación con la posición geográfica del seguidor solar como se muestra en la Figura 47.

Figura 47.*Interfaz aplicación SUN LOCATOR*

Nota: En la interfaz de *SUN LOCATOR* indica altura y azimut del sol con respecto a la ubicación geográfica del seguidor solar

7.2.3 Ajuste de posición

Obteniendo la información de la posición solar y del panel FV, se realiza una comparación, en la cual la diferencia de ángulo se corrige por medio del programa de control del sistema y se asegura de que los ángulos de elevación y azimut se correspondan con la posición esperada para captar la mayor cantidad de luz solar.

7.2.4 Resultados de calibración

La Tabla 17 documenta los resultados de la calibración preoperativa del seguidor solar. En esta etapa, se lleva a cabo una primera medición (ACTUAL) de las posiciones en azimut y elevación del sol por medio de SUN LOCATOR, así como del seguidor solar, por medio de ANGLE METER y el programa de control.

Teniendo en cuenta las discrepancias en las mediciones, se ajusta la posición del seguidor solar con respecto a la posición del sol. Para esto, se mueve la posición del panel FV a conveniencia por medio del programa de control, hasta que los ángulos de elevación y azimut coinciden con respecto a la posición del sol. Al ajustar estos ángulos, se obtiene una segunda medición (FINAL) que se considera como el punto en el que el sistema queda calibrado y puede iniciar su operación en modo automático.

Tabla 17.

Resultados de calibración del seguidor solar

Dato	Sun Locator[°]		Angle Meter [°]		Seguidor Solar[°]	
	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación
Actual	261.3	24.5	200	30	210	30
Final	270.6	23.1	270	30	270	30

7.3 Valoración y pruebas de movimiento azimutal y cenital

El diseño experimental se enfocó en evaluar la capacidad del seguidor solar para seguir la trayectoria del sol a lo largo del día. A continuación, se detalla el registro del funcionamiento, ángulos de movimiento, comparación de las mediciones, análisis de desviaciones de movimiento y la evaluación comparativa del rendimiento entre estos puntos de referencia.

7.3.1 Registro de ángulos de movimiento

En la Tabla 18 se visualiza la primera parte del registro de ángulos de movimiento. En este segmento, se capturan imágenes de la bóveda celeste para verificar la alineación entre los haces

de irradiación directa del sol y la norma de la superficie del panel FV. Estas imágenes fueron tomadas el día 16 de noviembre, desde las 7:00 a. m. hasta las 4:00 p. m., con intervalos de una hora.

Tabla 18.

Registro de fotografías de la bóveda celeste



Nota: Registro fotográfico de la bóveda celeste, tomado el 16 de noviembre de 2023, colocando la cámara en un plano perpendicular a la normal del panel FV, siguiendo las indicaciones mostradas en la Figura 42.

En la segunda fase de registro, se realizaron mediciones de la posición angular del seguidor solar en sus dos grados de libertad. Las figuras 48 y 49 registran las mediciones efectuadas el día 18 de noviembre de 2023, con intervalos de 15 minutos, entre las 8 a. m. y las 4 p. m. El propósito

de este procedimiento fue recopilar un conjunto de datos que facilitara una evaluación del rendimiento del seguidor solar en diferentes horas del día.

Figura 48.

Medición de azimut del panel FV con respecto a la ubicación del sol, para el día 18 de noviembre 2023

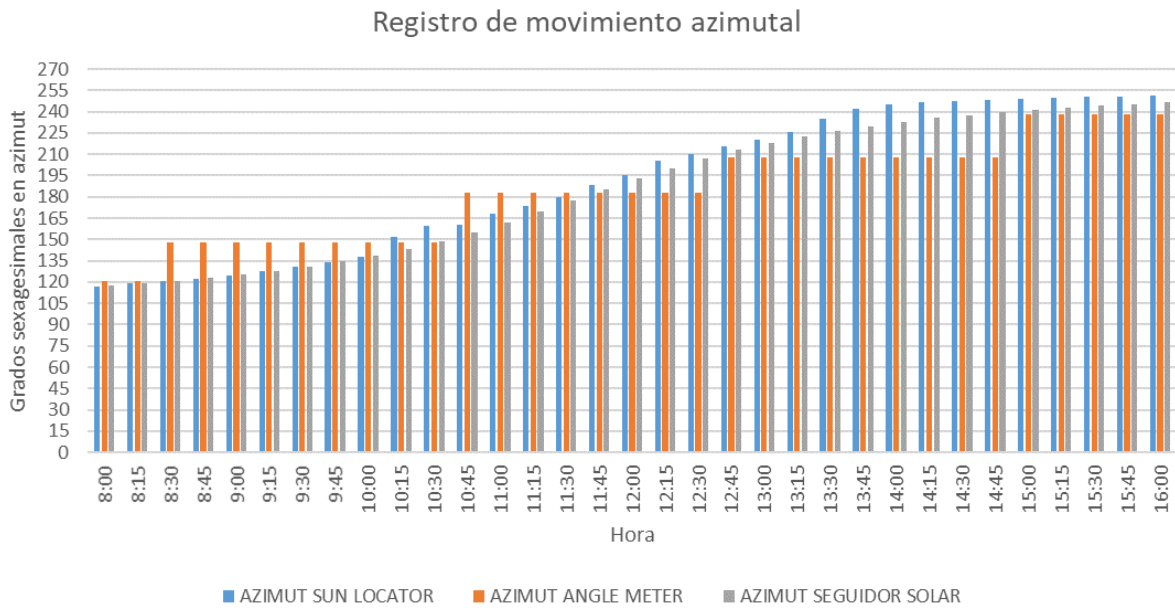
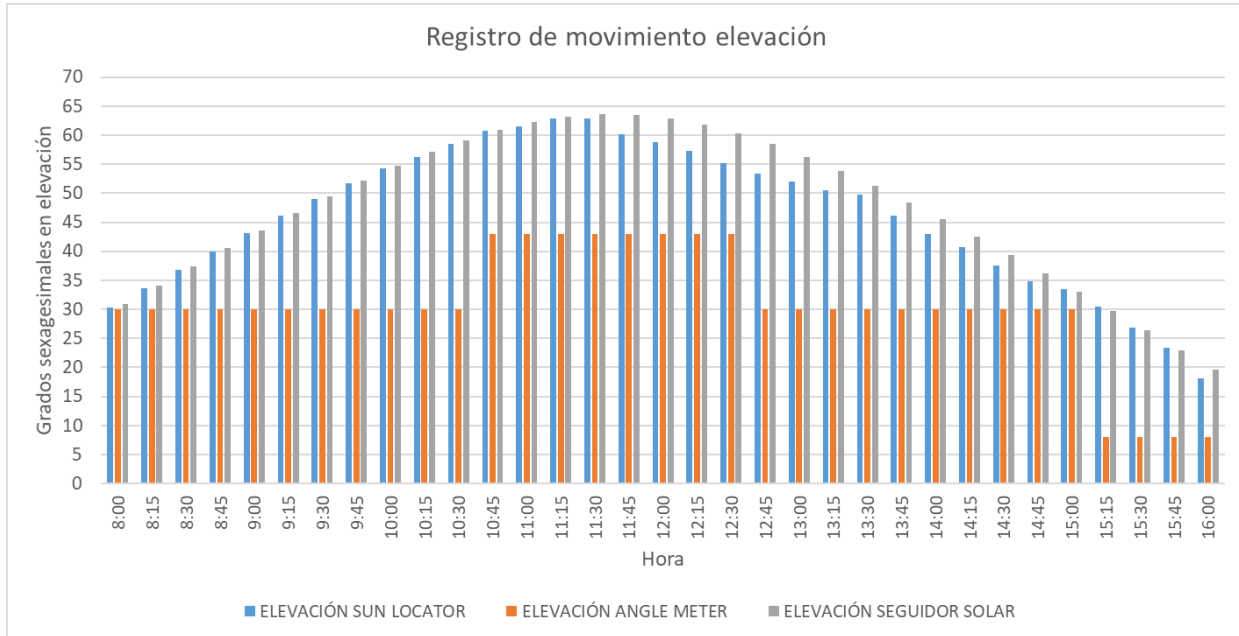


Figura 49.

Medición de elevación del panel FV con respecto a la ubicación del sol, para el día 18 de noviembre de 2023.



7.3.2 Comparación de mediciones

Al comparar las mediciones obtenidas de las tres fuentes, se detectan desviaciones de movimiento en algunos momentos del día. Para evaluar la precisión del seguidor solar, se utiliza el valor porcentual promedio, tomando como referencia la aplicación SUN LOCATOR para el valor teórico, mientras que los valores registrados por la aplicación ANGLE METER y el programa de control se consideran mediciones experimentales de la posición del Sol. En la Tabla 19, se pueden observar los valores promedio de error porcentual que se calcularon con la siguiente fórmula.

$$Error\ porcentual\ promedio(\%) = \frac{\sum |Valor\ experimental - Valor\ teórico|}{\sum Valor\ teórico} \times 100\%$$

Tabla 19.*Valores de error porcentual promedio*

Día	Sun locator		Angle meter		Seguidor solar	
	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación
18/11/2023	0 %	0 %	3.24 %	34.22 %	2,32 %	2,46 %

7.3.3 Análisis de desviaciones de movimiento

Los errores porcentuales en el movimiento azimutal se reflejan en promedio con un valor menor en comparación con los movimientos de elevación. Esto se debe a que los niveles de cuantificación del movimiento azimutal son mayores en comparación con los errores en la elevación, como se ilustra en la Figura 43. Sin embargo, al evaluar la eficiencia de funcionamiento, se puede considerar satisfactorio, dado que se espera un desplazamiento de aproximadamente treinta grados entre estos niveles para pasar al siguiente nivel, tanto en azimut como en elevación.

Adicionalmente, los errores porcentuales que se observan en la Tabla 19, están relacionados con la retroalimentación del *Encoder* con respecto al movimiento del eje de rotación en azimut y elevación. Si se contara con un mecanismo de transmisión más eficiente que girara de manera adecuada en relación con el motor, como por ejemplo un potenciómetro digital de pasos mucho más cortos que el actual o un potenciómetro analógico con un método de comunicación preciso, podríamos lograr un porcentaje promedio de error inferior al que se ha observado en las pruebas de verificación de funcionamiento.

7.4 Pruebas y valoración de variables microclimáticas

En esta sección, se presenta el análisis de los resultados obtenidos y de las curvas que se derivan de las mediciones realizadas durante el mes de diciembre. El objetivo del análisis fue evaluar el funcionamiento de la instrumentación electrónica empleada. Además, se registraron datos cada 5 minutos durante tres días consecutivos para corroborar su funcionamiento. Con base en estos registros, se realizaron análisis específicos para cada conjunto de datos.

7.4.1 Irradiancia solar horizontal y en panel FV

Para evaluar el funcionamiento de los piranómetros, se garantiza un suministro de tensión de alimentación de 3 Vdc. Posteriormente, se sometieron a distintas condiciones de iluminación, variando la intensidad de la luz recibida. Se esperaba que el valor de irradiancia medido por los piranómetros fuera proporcional a la cantidad de luz incidente y que disminuyera a cero al taparlos completamente. Estos resultados se presentan en la Figura 50, la cual muestra la relación entre la irradiancia y la hora del día, así como el efecto de bloquear la luz sobre los piranómetros.

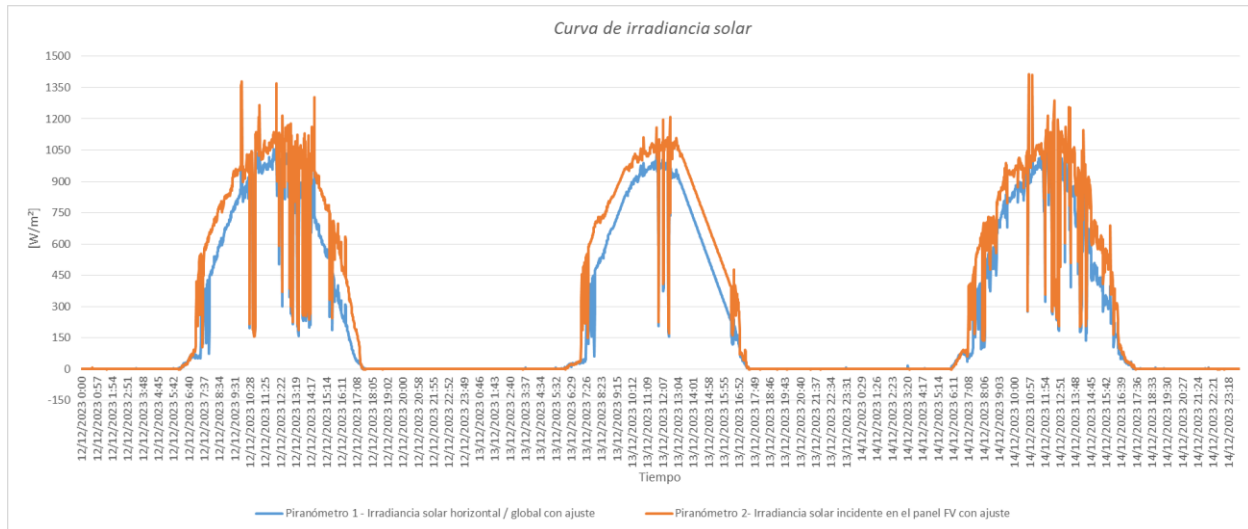
Figura 50.

Prueba bloqueo de irradiancia solar a piranómetros.



Nota: En las imágenes se aprecia el cubrimiento de los piranómetros durante prueba de incidencia de luz solar y los datos obtenidos cuando el dispositivo no recibe luz.

Adicionalmente, en la Figura 51, se aprecia el comportamiento típico de irradiancia sobre el panel FV, en donde se destaca un patrón consistente para los tres días analizados. También, se observa una variabilidad en los valores que coinciden entre las gráficas correspondientes. El valor pico de estas gráficas se registró al mediodía ya que este es el momento del día con la máxima irradiancia solar. Los picos más altos coinciden con los momentos en que el sol está en su punto más alto y el cielo está despejado. Además, la variación en los datos se atribuye a factores como el paso de nubes, que temporalmente bloquean la radiación directa solar.

Figura 51.*Curva de irradiancia solar*

Nota: La figura ilustra las curvas de irradiancia solar incidente registradas en el piranómetro horizontal y en el piranómetro del panel FV durante los días 12, 13 y 14 de diciembre de 2023.

La irradiancia en el piranómetro 2 (seguidor solar) no siempre es superior a la del piranómetro 1 (inclinación horizontal), especialmente durante las primeras y últimas horas del día. Esto podría deberse a que el ángulo de incidencia de la luz solar es bajo al amanecer y al atardecer, lo que significa que la orientación optimizada del seguidor solar no proporciona una ventaja significativa durante estos tiempos en comparación con una superficie horizontal.

Bucaramanga tiene un clima tropical con abundante luz solar durante todo el año. La gráfica mostrada en la Figura 51 refleja un alto nivel de irradiación solar, coherente con las expectativas para una ubicación en Colombia, cerca al ecuador terrestre donde la irradiación solar es generalmente alta.

Figura 52.

Comparación Diaria de Irradiancia solar entre Gh y Ginc.

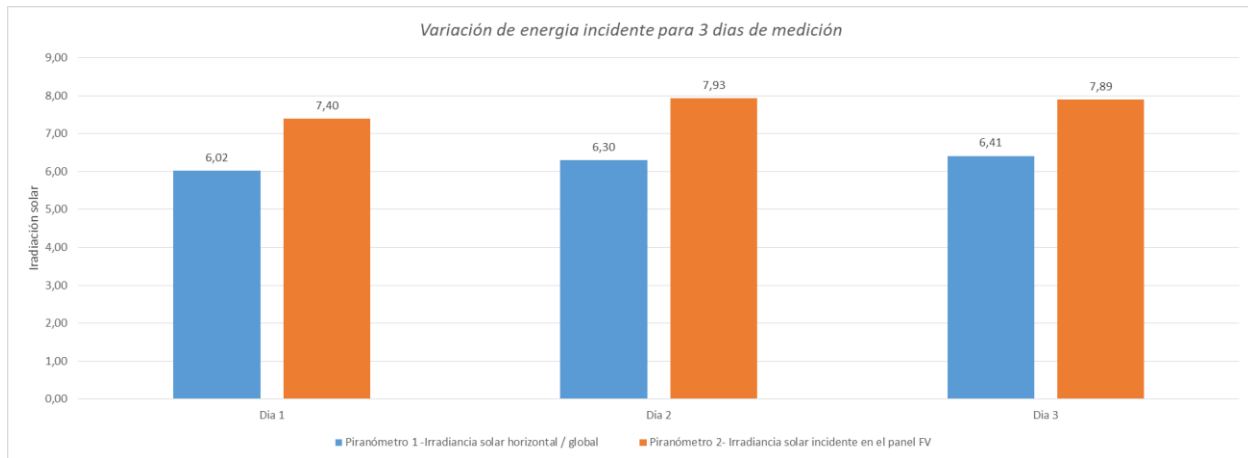


Al analizar la Figura 52, se puede observar la ganancia en irradiancia. Este hallazgo es fundamental para entender cómo varía el rendimiento del seguidor solar a lo largo del día. Además, se pueden apreciar picos tanto positivos como negativos en la gráfica. Los picos negativos se presentan en los momentos en los que la irradiancia horizontal es mayor, generalmente son en las primeras horas de luz solar.

7.4.2 Variación de energía incidente

Figura 53.

Variación de energía incidente para 3 días de medición.



Nota: La figura ilustra la variación de energía incidente en kWh/m² por día durante los días 12, 13 y 14 de diciembre.

Al analizar los resultados tanto de la Figura 53, que corresponde a la irradiancia incidente en kWh/m²día para tres días de medición, se evidenció un incremento en el porcentaje de la irradiancia. Para este caso en específico se logró un aumento en la captación de irradiancia solar aproximadamente 23%, esto comparado con los datos arrojados por el piranómetro cuya posición es horizontal.

Adicionalmente, cada piranómetro utiliza una curva de ajuste, la cual permite corregir los posibles errores del instrumento y obtener datos más exactos. Tales curvas de ajuste fueron obtenidas a partir de un proceso de medición comparativo utilizando un piranómetro SMP11 de Kipp&Zonen (*Secondary standard / Class A ISO 9060*). Estas curvas son:

$$Y = 0,9854 * X - 0,3756 \quad \text{Ec. (1)}$$

$$Y = 1,0581 * X - 6,0289 \quad \text{Ec. (2)}$$

En este caso, la Ecuación (1) representa la curva de ajuste del piranómetro 1 (global /horizontal), mientras que la Ecuación (2) representa la curva de ajuste del piranómetro 2 (Panel FV).

Tabla 20.

Porcentaje de incremento de la captación de luz solar.

Día	Piranómetro 1 - irradiancia solar horizontal / global	Piranómetro 2 - irradiancia solar incidente en el panel FV
1	6,02	7,40
2	6,30	7,93
3	6,41	7,89
Total	18,74	22,15
	Porcentaje de diferencia (%)	23,92

Porcentaje de aumento(%)

$$= \frac{|Irradiancia \text{ total panel FV} - Irradiancia \text{ global total}|}{Irradiancia \text{ global total}} \times 100\%$$

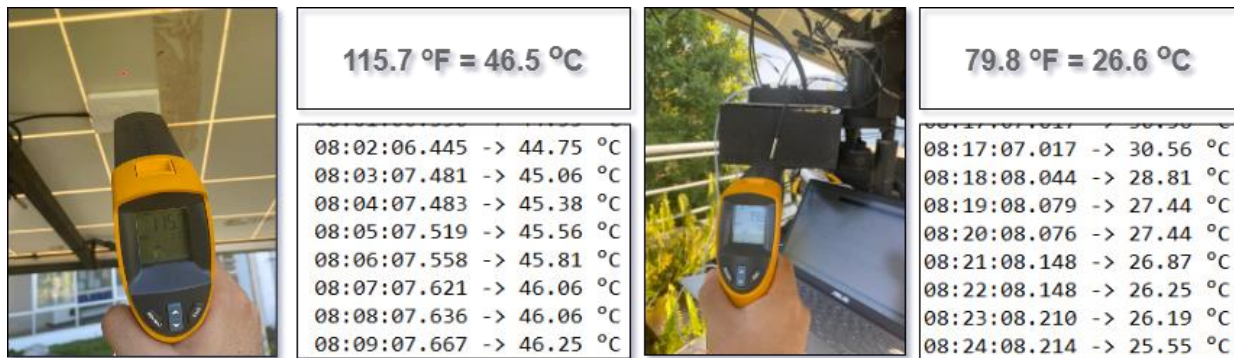
El beneficio energético real del seguidor solar se puede determinar calculando la diferencia entre la energía producida por el panel FV estático y la producida por el panel FV móvil, teniendo en cuenta el consumo energético del propio seguidor. Tal análisis será un trabajo futuro durante un lapso de un año, con el fin de caracterizar el incremento porcentual según el mes.

7.4.3 Temperatura de panel FV y ambiente

Para garantizar el correcto desempeño de los sensores de temperatura, se les aplicó un aislamiento de poliestireno expandido, cuyo objetivo es prevenir interferencias externas, como el aire u otros factores, que podrían afectar su funcionamiento. Para evaluar el desempeño de estos sensores, se utilizó un termómetro tipo pistola *FLUKE 561*, capaz de medir la temperatura sin necesidad de contacto directo con la superficie de interés. Se compararon los valores obtenidos por el termómetro con los datos proporcionados por los sensores para verificar la consistencia de las mediciones.

Figura 54.

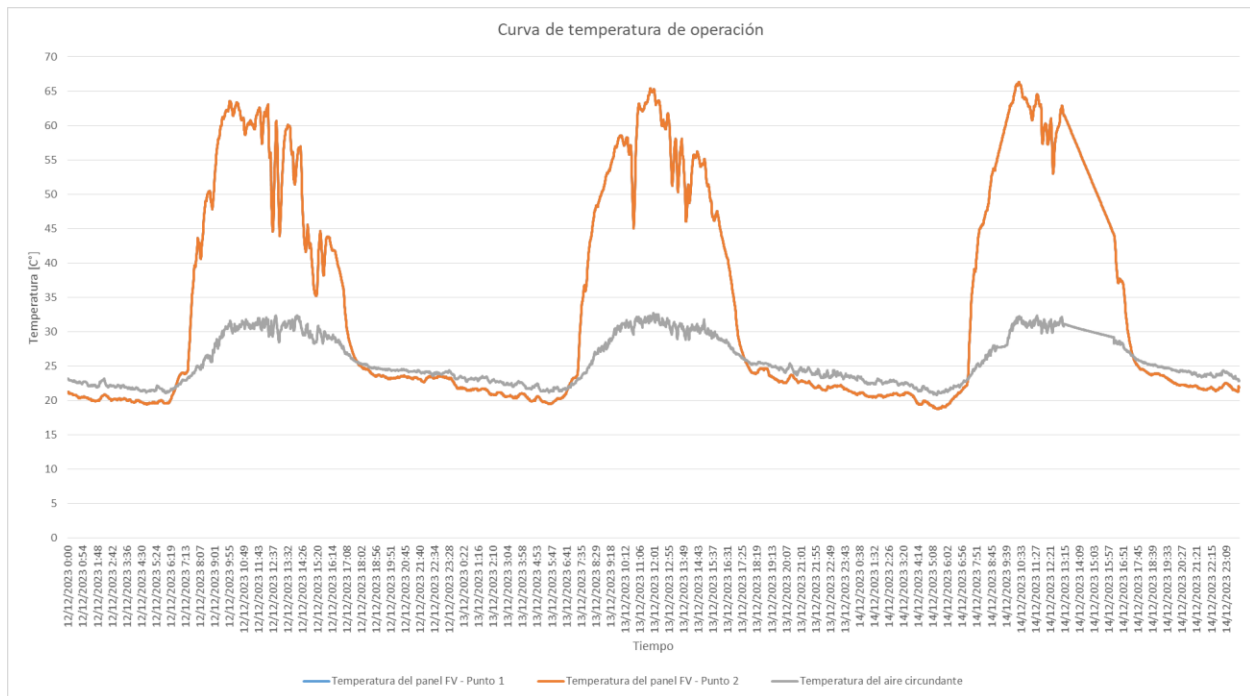
Pruebas de temperatura a termocuplas



Nota: Las imágenes que se muestran representan la medición respectiva de la temperatura del panel FV y la temperatura ambiente para corroborar las temperaturas cabe aclarar que la pistola realizaba la medición en °F.

Figura 55.

Curva de temperaturas de operación



Nota: La figura ilustra la curva de temperatura de operación del panel FV, con tres puntos de medición, dos puntos en la parte posterior del panel FV y un punto en el ambiente para los días 12, 13 y 14 de diciembre de 2023.

Considerando la Figura 57, se observa que el panel FV está expuesto a temperaturas de cercanas a 63 °C, esta situación puede afectar su rendimiento, dado que las altas temperaturas influyen negativamente en el Panel FV, ya que la eficiencia de conversión de los paneles FV se reduce ligeramente, esto debido a que a medida que aumenta la temperatura del silicio se produce una caída de tensión, haciendo que la capacidad de generar energía se vea reducida. Además, las curvas son correspondientes ya que en horas de la noche las temperaturas tratan de igualarse, lo que indica que los patrones son coherentes. También, factores como el aislamiento influyen en que los valores no sean iguales.

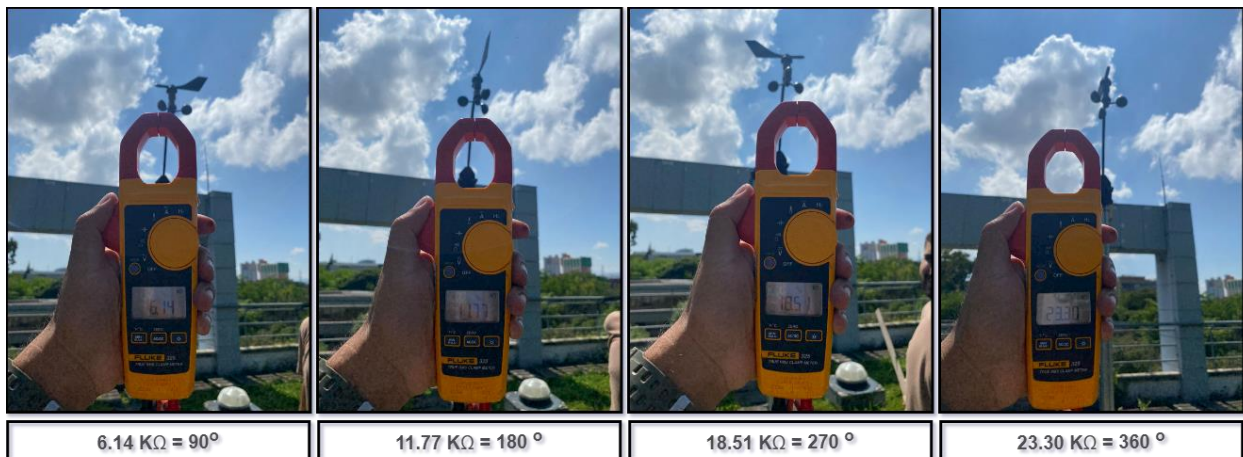
En un trabajo posterior se pueden obtener las curvas de ajustes para mejorar la exactitud de los datos obtenidos a partir de los sensores de temperatura.

7.4.4 Dirección del viento

Para realizar las pruebas de velocidad del viento mediante una veleta, se utilizó una pinza amperimétrica *FLUKE 325*. Esta herramienta posibilita la medición de la resistencia generada por la veleta en función de su orientación hacia el norte, la cual es proporcional a su movimiento, como se ilustra en la Figura 56. De esta manera, se logró identificar y ajustar su orientación.

Figura 56.

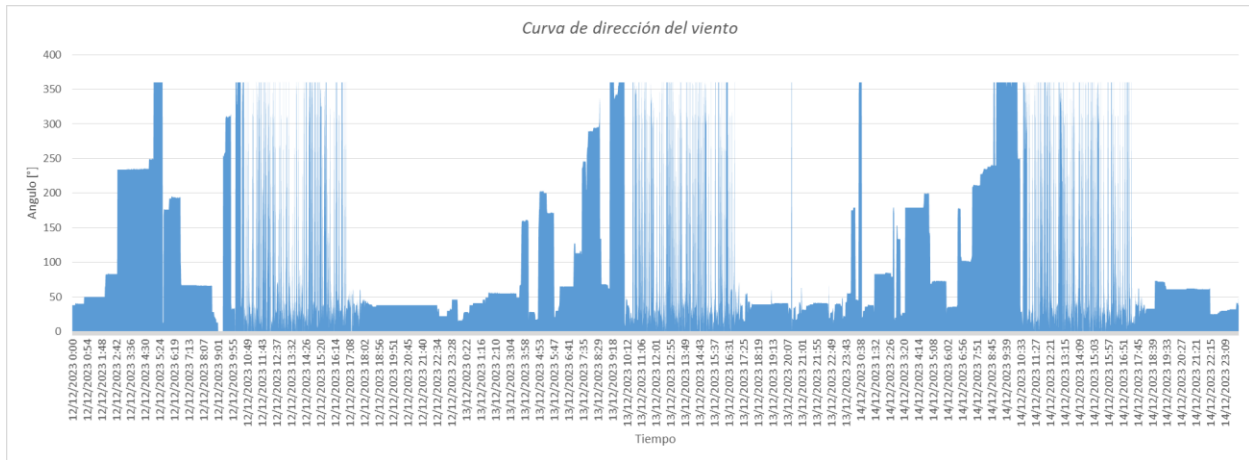
Pruebas de dirección del viento en veleta.



Nota: Las imágenes representan de izquierda a derecha la conversión de Ω a grados sexagesimales con el fin de entender y comprobar el funcionamiento de la misma.

Figura 57.

Curva de dirección del viento



Nota: La figura ilustra la curva de dirección del viento en la ubicación del panel FV, durante los días 12, 13 y 14 de Diciembre del 2023

Basándose en el análisis de la Figura 57, se puede concluir que la dirección predominante del viento tiende a señalar hacia los valores próximos a 0 y 360°. Esta observación sugiere que la orientación del edificio en cuestión fue estratégicamente planificada, con el norte como punto de referencia, que se corresponde con los 360° en la veleta.

7.4.5 Velocidad del viento

Para realizar pruebas de velocidad del viento con el anemómetro, se utilizó un Termo-Anemómetro digital portátil *EXTECH INSTRUMENTS AN100 CFM/CMM*. Este instrumento proporcionó una estimación de la velocidad de las corrientes de viento del lugar en donde se encuentra el anemómetro, lo cual respalda las mediciones obtenidas.

Figura 58.

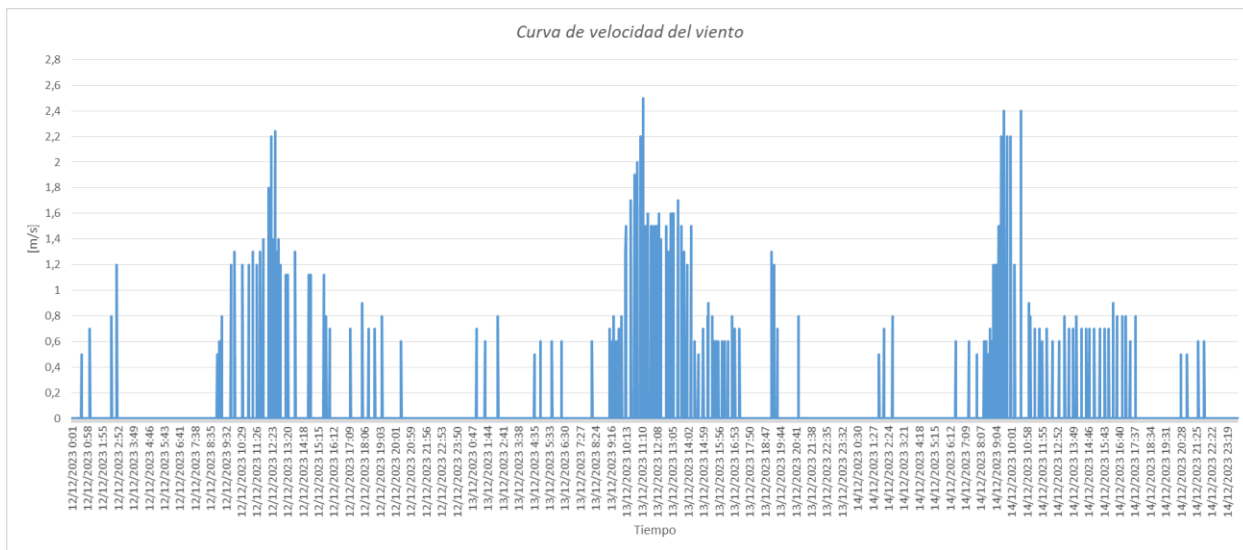
Pruebas de velocidad del viento a anemómetro.



Nota: La imagen representa la medición con un anemómetro portátil y a la parte derecha los valores obtenidos con nuestras medidas.

Figura 59.

Curva de velocidad del viento

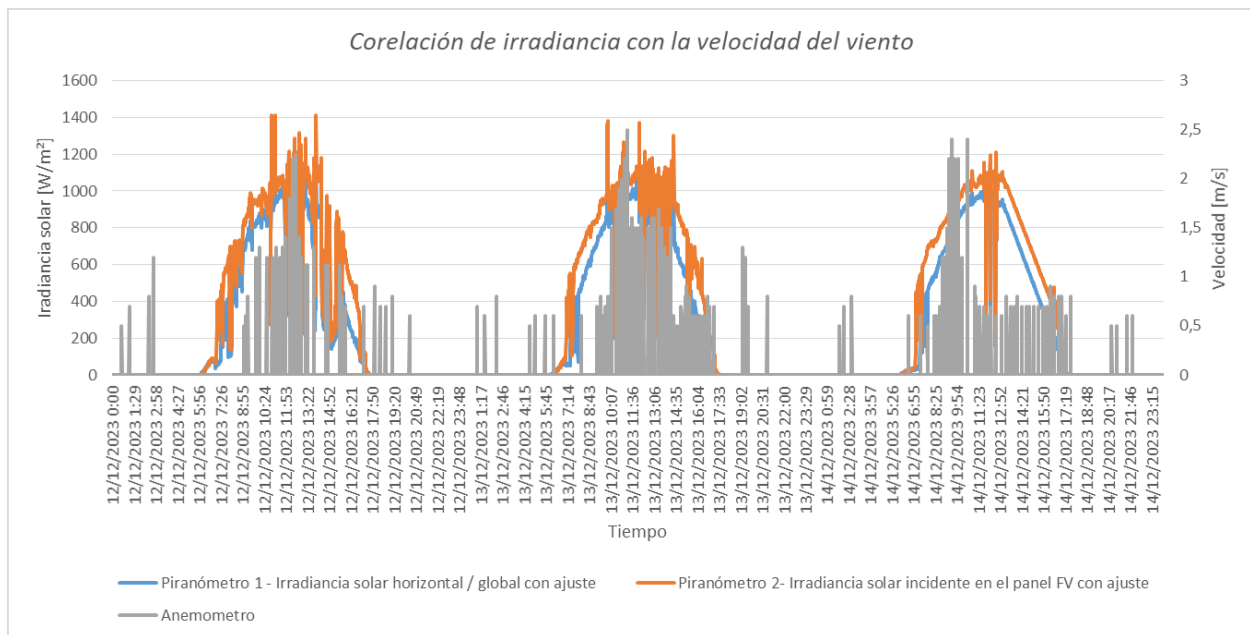


Nota: La figura ilustra la curva de velocidad del viento en la ubicación del panel FV, durante los días 12, 13 y 14 de Diciembre del 2023

Para efectos de análisis, la Figura 60 representa la curva medida del anemómetro en correlación con la irradiancia. Cabe recalcar que, basándose en la imagen, se pueden notar que las horas de mayor movimiento o de mayor variación corresponden en su mayoría a un lapso donde se presenta la mayor irradiancia y a su vez deben corresponder de manera significativa con la curva de la dirección del viento. Adicionalmente, se puede apreciar que para esta zona en particular los vientos no superan los 3 m/s.

Figura 60.

Correlación de irradiancia con la velocidad del viento



Nota: En la figura se muestran dos gráficas con dos ejes verticales que comparten el eje horizontal. En este caso, la gráfica azul y naranja su eje vertical es el izquierdo, mientras que la gráfica gris su eje vertical es el derecho.

7.5 Valoración de consumo de energía

El consumo de energía del seguidor solar se evalúa con el fin de estimar su eficiencia, impacto ambiental, costos operativos y viabilidad económica. Para esta actividad se realizó un inventario de todos los posibles dispositivos presentes en el seguidor solar que generen algún tipo de consumo de energía y se analizó cada uno de ellos para valorar el consumo global del seguidor solar.

7.5.1 Dispositivos electrónicos de control y monitorización

Para estimar el consumo de energía, se recopiló información de cada dispositivo y se analizó de manera detallada el consumo de energía durante su funcionamiento. La Tabla 21 presenta los datos de cada dispositivo utilizado.

Tabla 21.

Consumo de energía en dispositivos de control e instrumentación electrónica.

Dispositivo	Corriente [mA]	Voltaje [V]	Potencia [W]
Arduino Mega	93	5	0,465
Raspberry PI 3+	500	5	2,5
Anemómetro y veleta DAVIS	4	5	0,020
Encoder KY-040	8	5	0,040
Piranómetros	1	3	0,003
Termocuplas	5	5	0,025

Nota: En la tabla se notan los valores de consumo de cada dispositivo, la información mostrada se obtuvo mediante los datos de placa según su fabricante, estos son constantes a lo largo del tiempo.

7.5.2 Dispositivos de potencia

Para medir el consumo de potencia de los servomotores, se utilizó el PWR check. De acuerdo a las figuras 49 y 50, se elaboró una estimación de movimientos, calculando el tiempo que tarda en realizarse el movimiento de posicionamiento (aproximadamente entre 30 segundos en azimut y 30 segundos en cenit) que varía en 30° grados en azimut y 20° grados en cenit, y la cantidad de movimientos de posicionamiento que se realiza a lo largo del día mientras hay luz solar. El resultado de este cálculo se multiplicó por dos para abarcar el tiempo en que el seguidor tarda en volver a su posición inicial. La Tabla 22 describe la cantidad de movimientos del seguidor solar y su duración estimada. El Apéndice K aporta más detalles de movimiento.

Tabla 22.

Cantidad de movimientos y su duración estimada.

Movimiento	Tiempo [s]	Cantidad de Movimientos	Tiempo Total de funcionamiento [s]
Azimut	30	10	600
Cenit	30	4	240

Nota: La tabla muestra la estimación del tiempo en minutos que corresponde al movimiento de todo un día. Debido a que el seguidor retorna, este tiempo total de funcionamiento se duplica.

Para realizar la estimación de cuánta energía usa el sistema, se sumaron todas las potencias generadas por cada uno de los dispositivos presentes en el seguidor solar; cabe aclarar que los dispositivos encargados de la medición y monitorización de las variables estarán en funcionamiento las 24 horas del día.

Figura 61.

Gráfica de movimiento del seguidor y su estimación de potencia a lo largo de un día de operación.

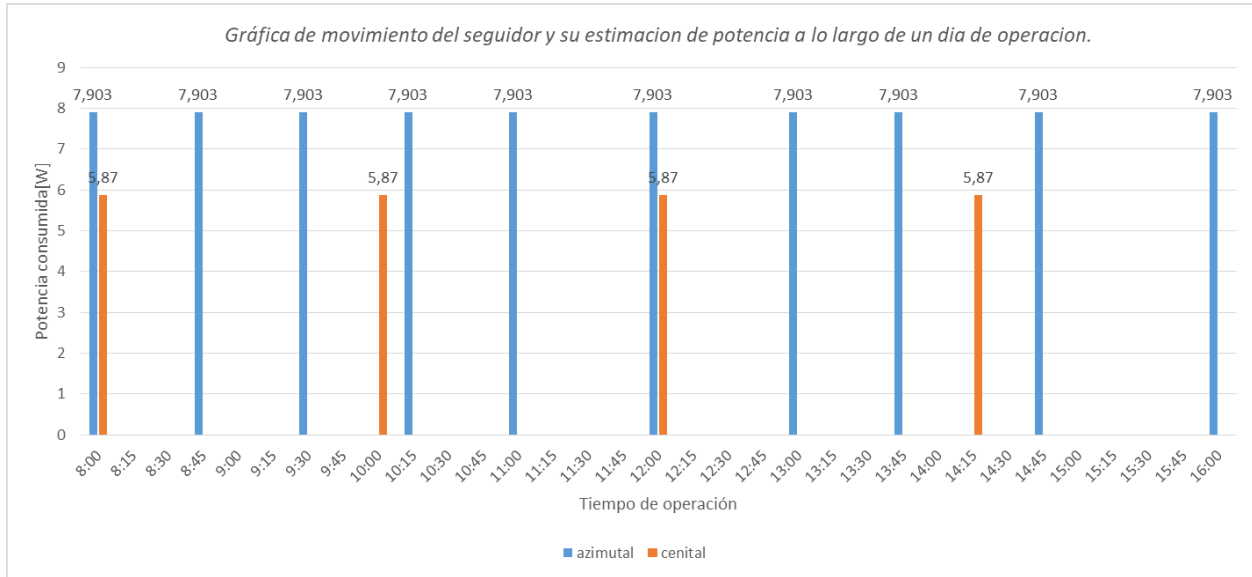


Tabla 23.

Consumo de energía de los servomotores.

Movimiento	Corriente [mA]	Voltaje [V]	Potencia [W]
Azimut	350	22,58	7,903
Cenital	260	22,58	5,870

Nota: En la tabla se notan los valores de operación de los servomotores, se hace énfasis en que son datos mostrados por el monitor PWR check y su consumo es en cada movimiento.

Tabla 24.*Consumo global del seguidor.*

Cantidad	Dispositivo	Tiempo [h]	Potencia[Wh/día]
1	Arduino Mega	24	11,16
1	Raspberry PI 3+	24	60
1	Anemómetro y veleta DAVIS	24	0,48
2	Encoder KY-040	24	1,92
2	Piranómetros	24	0,14
3	Termocupla	24	1,8
1	Servomotor azimut	0,16	1,31
1	Servomotor cenit	0,06	0,38
Energía total consumida por el seguidor [Wh/día]			77,19

La energía total consumida, tal como se observa en la Tabla 24, es un valor muy útil para estudiar de manera más correcta el desempeño del seguidor solar.

8. Conclusiones

Se ha completado la fase de desarrollo del sistema de control para poner en funcionamiento de manera continua un seguidor solar ubicado en el quinto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Se diseñó un circuito de control con Raspberry Pi 3 B+, driver L298N y Arduino Mega, y un circuito de potencia con Fuente de Alimentación AC, 2 breakers monopolares, Fuente de Alimentación DC de 24V, medidor PWR Check y medidor AcuDc 240 para el seguidor solar. Los diseños consideran medidas de protección para sobrecorrientes, sobretensión y condiciones ambientales adversas, asegurando el funcionamiento adecuado del sistema.

La puesta en marcha del seguidor solar inactivo durante aproximadamente 6 años se llevó a cabo mediante un proceso meticuloso. El diagnóstico exhaustivo, la limpieza y lubricación de componentes mecánicos, así como la verificación del cableado eléctrico y las pruebas de los servomotores, no solo identificaron y abordaron desgastes y daños, sino que también aseguraron las adaptaciones necesarias para garantizar el óptimo movimiento del panel fotovoltaico. Este enfoque integral ha sido fundamental para restablecer el funcionamiento eficiente del sistema, marcando así un hito en su revitalización después de un periodo prolongado de inactividad.

La revisión y posterior diseño de una nueva etapa de control y potencia para el seguidor solar ha sido crucial, dada la obsolescencia del circuito original por daño en la tarjeta de potencia y la ausencia de su sistema de control. La exploración de alternativas, como el uso de tarjetas de desarrollo de bajo costo, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar los recursos del sistema, facilitar la puesta en marcha y permitir la futura integración de instrumentos de medición adicionales, marcando así un paso significativo hacia la eficiencia y adaptabilidad del sistema.

Se analizaron los dispositivos disponibles para la monitorización de variables. Luego, se estudió la compatibilidad de estos dispositivos con Arduino, que fue la tarjeta seleccionada para la recopilación de datos. Después, se reemplazaron los sensores de temperatura (PT100) al no ser compatibles con Arduino. En su lugar, se instalaron sensores más adecuados (DS18B20), que cumplían con su función con mayor facilidad y exactitud. Finalmente se implementaron varias estrategias para acoplar estos dispositivos con Arduino y se logró la monitorización exitosa de las variables.

Se detalla la implementación exitosa de la etapa de control y estrategia de monitorización para el panel fotovoltaico (FV). Se ha adoptado un sistema de control de posición angular en lazo cerrado, aprovechando acoples de motores y Encoder rotativos. La estrategia se enfoca en ajustar

la posición real del panel FV en función del error entre su posición y la posición solar, calculada mediante la librería PVlib. El desarrollo del código en Python, junto con el uso de la librería PVlib y modelos astronómicos precisos como el JPL DE432L, permite calcular con precisión la posición solar. La conversión de datos de encoders y las medidas de seguridad adicionales han fortalecido la robustez del sistema. Sin embargo, la dependencia de la exactitud de los modelos astronómicos y la necesidad de mediciones precisas de los encoders representa una clara problemática, se sugiere que futuras mejoras se enfoquen en optimizar el rendimiento del algoritmo de control y consideren la implementación de tecnologías adicionales para enfrentar diversas condiciones operativas.

Se llevó a cabo la creación de un aplicativo online para la visualización de las variables monitorizadas en el proyecto. Esta es una página web alojada en Google Sites, que proporciona información detallada, incluyendo archivos, códigos y diagramas relacionados con el proyecto. A través del banner "Monitorización", se accede al aplicativo web que exhibe variables asociadas al panel FV cuando se está conectado a la red "comunidad_UIS" dentro de la universidad. El proceso de recopilación y transmisión de datos se lleva a cabo mediante un archivo JSON, generado por un código en Python que también calcula la posición del sol con la librería PVLIB. Este archivo facilita la visualización en un sitio web alojado en el servidor Apache. En términos de diseño, se implementó una interfaz sencilla y fácil de usar, presentando los datos en formato de lista para un acceso rápido. Se incluyó una imagen que guía al usuario para identificar a cuál sensor corresponde cada variable y su ubicación. Este aplicativo web cumplió con éxito su propósito al facilitar la monitorización y análisis eficiente de las variables del proyecto. Se destacan aspectos positivos como la interfaz amigable y la capacidad de descarga de datos, mientras que se reconoce la necesidad de recargar la página para obtener actualizaciones en tiempo real como una limitación a considerar.

Se puede notar que el uso del seguidor solar permite aprovechar mejor la irradiancia solar que incide sobre el panel FV, en los días analizados (12 al 14 de diciembre), se observó un aumento del desempeño de aproximadamente el 23 %. Esto demuestra que el seguidor solar es una tecnología que permite mejorar el desempeño de la generación fotovoltaica.

9. Recomendaciones

Se recomienda seguir el plan de mantenimiento regular para el seguidor solar, el cual está detallado en el Apéndice H e incluye tareas como la limpieza de los paneles fotovoltaicos, la inspección de componentes y la calibración de posicionamiento periódica.

Se recomienda, en caso de ser necesarias reparación en el sistema de control y/o potencia, utilizar componentes de seguridad eléctrica.

Se debe tener en cuenta el sellado y la protección de los gabinetes eléctricos y cajas de control, teniendo en consideración la exposición a las condiciones climáticas. Asegúrese de que todos los componentes estén adecuadamente sellados y protegidos contra la humedad y otros elementos ambientales, lo que puede lograrse mediante el uso de impermeabilizantes y sellos apropiados.

Se recomienda adquirir una batería de respaldo con el propósito de brindar un servicio continuo de energía a las tarjetas del seguidor solar, ya que éstas son las que operan el sistema y recopilan información de las variables microclimáticas. Como parte de éstos, se recomienda una batería de 20 W y una tensión de salida de 5 V. Tales baterías podrían ser tipo USBexterna, sin

embargo, debe ser superior a 10000 mAh debido a que los sensores se alimentan desde la Raspberry incluyendo el Arduino.

Referencias Bibliográficas

- Accuenergy. (2015). *EV/DV300 Series three phase multifunction power and energy meters*.
<https://www.accuenergy.com/wp-content/uploads/EV300-Multifunction-Panel-Power-Energy-Meter-%20user-manualv2.pdf>
- Aristizábal, H., López Flórez, S., Hincapié Correa, J. A., & Ríos González, L. H. (2020). Pid-fuzzy of dc motors using raspberry PI. *Visión Electrónica*, *14(1)*, 86–101.
doi:<https://doi.org/10.14483/22484728.16361>
- Asabeneh. (s.f.). *30-Days-Of-Python: 30 days of Python programming challenge is a step-by-step guide to learn the Python programming language in 30 days*.
<https://www.youtube.com/channel/uc7pnruno1rzymb1xla4yktw>
- CDMB. (2022). *Informe de la Red Hidroclimatológica, 1er trimestre 2022*.
<http://caracoli.cdmdb.gov.co/cai/rhc/docs/RHC/Informe%20RHC%20CDMB%20I%20Semestre%202022.pdf>
- ENPHASE. (2016). *Manual de instalación y funcionamiento. Microinversores Enphase M250 y M215*. <https://www4.enphase.com/sites/default/files/downloads/support/M215-M250-manual-ES-LAC.pdf>
- Garrido Satué, M., Castaño Castaño, F., Ortega Linares, M. G., & Rodríguez Rubio, F. (2022). Evaluación del desempeño por apuntamiento de estrategias de control para seguidores solares fotovoltaicos de alta concentración. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, *19(2)*, 174–185.
<https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/16905>

- Meteo Blue. (2023). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Bucaramanga*
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/bucaramanga_colombia_3688465
- Miranda Guerra, J. M., Tamayo Argüello, J. J., & Barrios Sánchez, J. M. (2016). *Diseño e implementación de la estrategia de movimiento para una unidad experimental de seguimiento solar con dos grados de libertad aplicado a generación fotovoltaica*. Bucaramanga: [Trabajo de Grado] Universidad Industrial de Santander.
- Naturaleza Climática, S.L. (2023). *Sistema de seguidores solares*.
<https://www.aficlina.com/nuevo-sistema-de-seguidores-solares>
- Osma Pinto, G. A. (2021). *Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander*.
- Pandas 2.0.3 Documentation. (s.f.). *User Guide*.
https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html
- Pvlib python. (s.f.). *Pvlib python 0.10.1 documentation*. <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/>
- Rosma, I. H., Asmawi, J., Darmawan, S., Anand, B., Ali, N. D., & B., A. (2018). "The implementation and analysis of dual axis sun tracker system to increase energy gain of solar photovoltaic. *2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (Icon EEI), Batam, Indonesia*, 187-190. doi:10.1109/Icon-Eei.2018.8784321
- Suthar, M., Singh, G., & Saini, R. (2013). Performance evaluation of sun tracking photovoltaic systems: a case study. *Fifth international conference on advances in recent technologies in communication and computing*, 328–335.
<https://chooser.crossref.org/?doi=10.1049%2Fcp.2013.2193>

Upsolar. (2010). *solar panel UP-M250-270P - electrical characteristics polycrystalline 6 pv module 60 cells*. <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/1ti0cbtz1/5d3e9fb2550e2.pdf>

Vergara-Barrios, P. P., Rey-López, J. M., Osma-Pinto, G. A., & Ordóñez-Plata, G. (2014). Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. *Rev UIS Ingenierías*, 13 (2), 49-57. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/49-57/6251>

Apéndices

Apéndice A. Diseño del sistema de seguimiento solar en SketchUp

Link de visualización:

<https://app.sketchup.com/share/tc/northAmerica/VbvyCD3bbIs?stoken=QjY->

[0ZGKkTelyMEQt7Sg3Cjaqp1Yrr2o3eEQjEBcdIEIzHDX0pDXwRPtnxVHtAdc&source=web](https://app.sketchup.com/share/tc/northAmerica/VbvyCD3bbIs?stoken=QjY-0ZGKkTelyMEQt7Sg3Cjaqp1Yrr2o3eEQjEBcdIEIzHDX0pDXwRPtnxVHtAdc&source=web)



Apéndice B. Comparación para la selección de Encoder KY-040

Característica	KY 040	EC11	KY 022	BOURNS PEC1
Tipo de codificador	Rotativo incremental.	Rotativo Incremental.	Rotativo Incremental.	Rotativo Incremental.
Salida	Señales A y B (cuadratura) que indican la dirección y la magnitud del giro.	Cuadratura con señales A y B.	Señales A y B (cuadratura) que indican la dirección y la magnitud del giro.	Cuadratura con señales A y B.
Resolución	20 pulsos por revolución.	con opciones como 15, 20 o 24 pulsos por revolución.	20 pulsos por revolución	16 hasta más de 1000 pulsos por revolución.
Alimentación	5V, compatible con 3.3V.	3.3V o 5V.	5V	5V o 24V
Pines	VCC, GND, CLK, DT. SW	VCC, GND, CLK, DT. SW	VCC, GND OUT	R VCC+, RVCC-, OUT
PRECIO (COP)	10000	3000	7000	17.000

Apéndice C. Comparación para la selección de Arduino Mega

Característica	Arduino Uno	Arduino Mega	Arduino Nano	ESP32	Microbit
Microcontrolador	ATmega328P.	ATmega2560.	ATmega328P.	Espressif ESP32.	Nordic Semiconductor nRF51822.
Velocidad de Reloj:	16 MHz.	16 MHz.	16 MHz.	Dual-core (dos núcleos Xtensa LX6 a 240 MHz).	ARM Cortex-M0 a 16 MHz.
Memoria Flash:	32 KB.	256 KB.	32 KB.	4 MB.	256 KB.
SRAM:	2 KB.	8 KB.	2 KB.	520 KB.	16 KB.
EEPROM:	1 KB.	4 KB.	1 KB.		
Pines de Entrada/Salida Digitales:	14 (incluyendo 6 con PWM).	54 (de los cuales 14 proporcionan PWM).	14 (incluyendo 6 con PWM).	36 (incluyendo pines PWM).	25 (incluyendo pines PWM).
Pines de Entrada Analógica:	6	16	8	18.	3.
Interfaces:	UART, SPI, I2C.	UART, SPI, I2C.	UART, SPI, I2C.	UART, SPI, I2C, I2S, CAN, Ethernet, Bluetooth, Wi-Fi.	Bluetooth Low Energy (BLE), Radio 2.4 GHz, I2C, SPI.
Voltaje de Operación:	5V.	5V.	5V O 3.3V	3.3V.	3V.
Corriente Máxima por Pin:	40 mA.	40 mA.	40 mA.	12 mA.	4 mA.
Voltaje de Alimentación:	7-12V (a través de la entrada Vin) o 5V (a través del conector USB).	7-12V (a través de la entrada Vin) o 5V (a través del conector USB).	7-12V (a través de la entrada Vin) o 5V (a través del conector USB).	3.3V (puede tolerar niveles de 3.3V o 5V para la entrada/salida).	2.0-3.6V (a través de batería o puerto USB).
Tamaño:	68.6 mm x 53.4 mm.	101.5 mm x 53.3 mm.	45 mm x 18 mm.	Varía según el módulo o la placa, pero suele ser compacto.	40 mm x 50 mm.

Característica	Arduino Uno	Arduino Mega	Arduino Nano	ESP32	Microbit
Conectividad USB:	Mediante un conector USB-B.	Mediante un conector USB-B.	Mediante un conector micro-USB.	Mediante un adaptador USB-Serial.	Conector micro-USB.
Programación:	A través del IDE de Arduino utilizando un adaptador USB-Serial o directamente a través del USB incorporado.	A través del IDE de Arduino utilizando un adaptador USB-Serial o directamente a través del USB incorporado.	A través del IDE de Arduino utilizando un adaptador USB-Serial o directamente a través del USB incorporado en modelos más recientes.	A través del IDE de Arduino o con el entorno de desarrollo de Expressif (ESP-IDF).	A través de un entorno basado en la web (MakeCode), <i>Python</i> o el entorno de desarrollo mbed.
PRECIO (COP)	40.000	150000	30000	35000	21000

Apéndice D. Comparación para la elección de Raspberry Pi 3 B +.

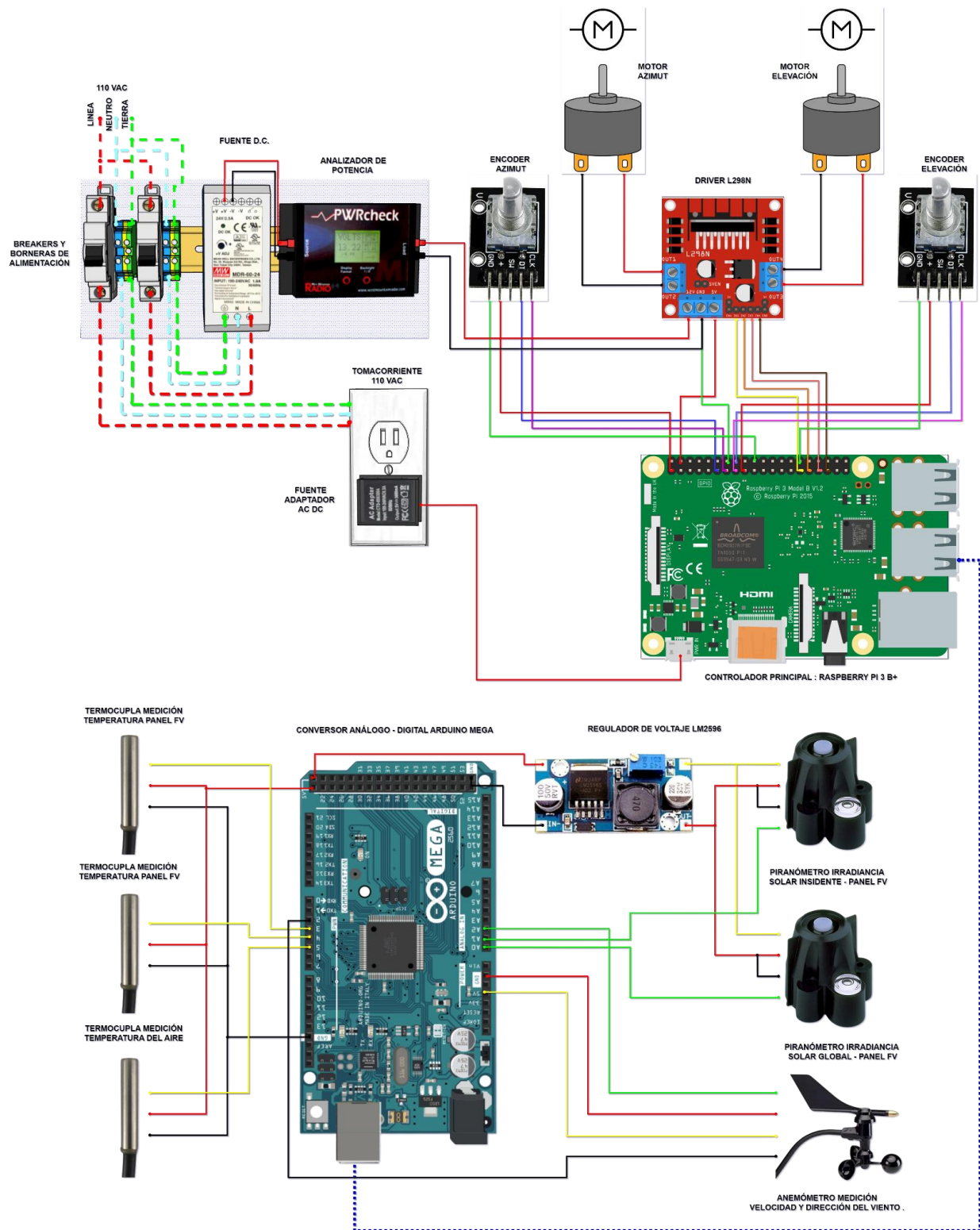
Característica	Raspberry PI 3 B+	Raspberry Pi 4 B	Nvidia Jetson Nano	Beagle Bone Black	Intel Edison
Microprocesador	Broadcom BCM2837B0, CPU ARM Cortex-A53 de cuatro núcleos a 1.4 GHz.	Broadcom BCM 2711, CPU ARM Cortex-A72 de cuatro núcleos a 1.5 GHz.	CPU ARM Cortex-A57 de cuatro núcleos a 1.43 GHz.	AM335x ARM Cortex-A8 de un solo núcleo a 1 GHz.	Dual-core Intel Atom 500 MHz.
GPU	VideoCore IV.	VideoCore VI.	Incluye una GPU NVIDIA Maxwell con 128 núcleos CUDA	PowerVR SGX530.	No tiene una GPU dedicada.
Memoria RAM	1 GB de LPDDR2.	2 GB, 4 GB o 8 GB de LPDDR4-3200 (dependiendo del modelo).	4 GB de LPDDR4.	512 MB de DDR3L.	1 GB de LPDDR3.
Conectividad	Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 4.2, 4 puertos USB 2.0, HDMI, GPIO.	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac de doble banda, Bluetooth 5.0.	Ethernet Gigabit, Wi-Fi y Bluetooth no integrados (se requiere adaptador USB), HDMI, conector para cámara MIPI CSI-2, GPIO.	Ethernet, USB 2.0, HDMI, 65 pines GPIO.	Wi-Fi y Bluetooth integrados, USB, GPIO, UART.
Almacenamiento	Tarjeta microSD	Tarjeta microSD (admite USB boot).	Tarjeta microSD, soporte para unidades USB y SATA.	4 GB de eMMC incorporado y ranura para	4 GB de almacenamiento eMMC.

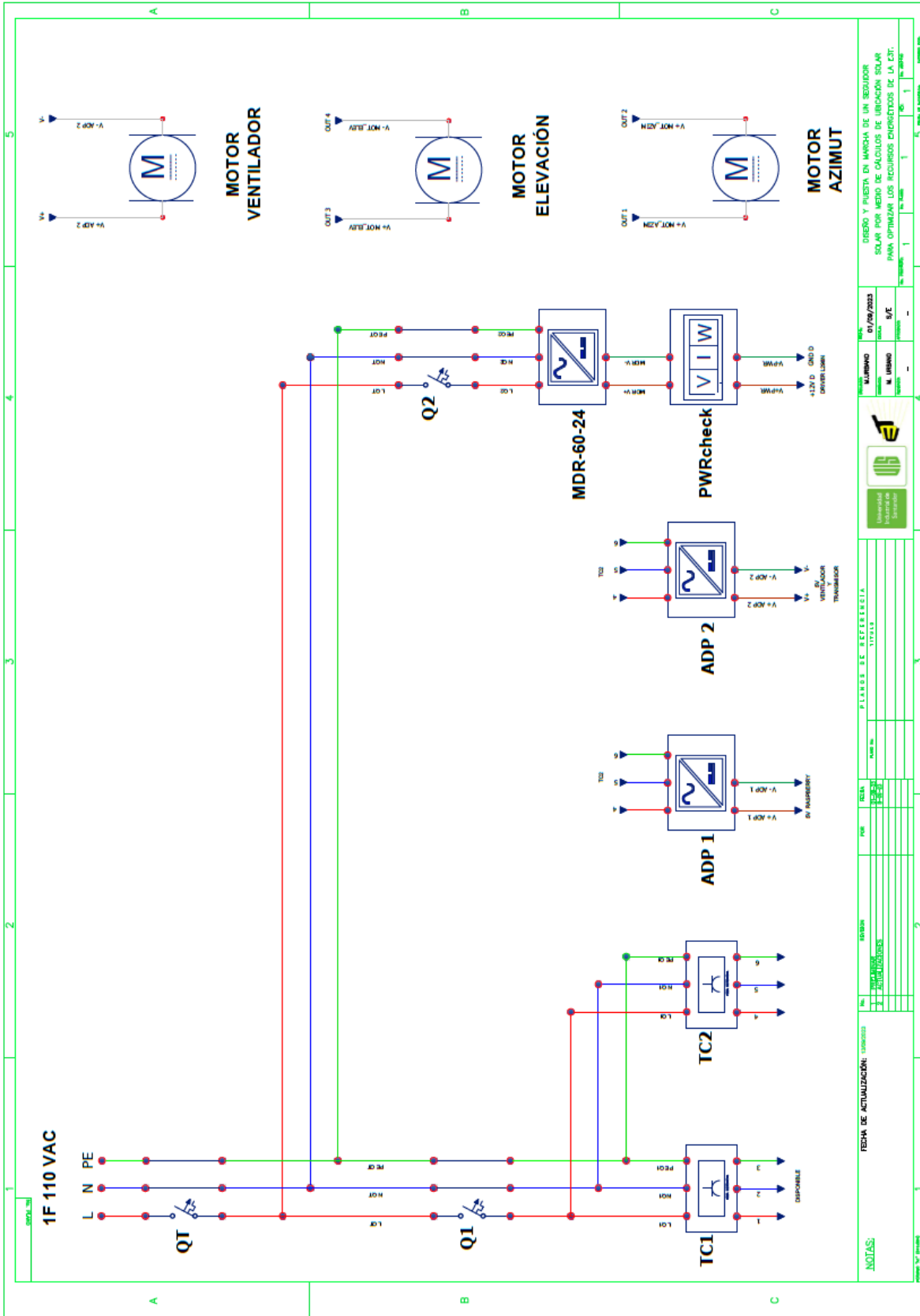
Característica	Raspberry PI 3 B+	Raspberry Pi 4 B	Nvidia Jetson Nano	Beagle Bone Black tarjeta microSD.	Intel Edison
Consumo de energía	2.5 W.	2.5 W y 7.6 W	5 - 10 W.	2 - 3 W.	3 - 4 W.
Sistema Operativo	Raspbian (basado en Linux).	Raspbian (basado en Linux).	Ubuntu Linux (otros sistemas también son posibles).	Varias distribuciones de Linux, incluyendo Debian y Ubuntu.	Varias distribuciones de Linux, incluyendo Yocto Linux.
Puertos USB	4 x USB 2.0.	2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0.	4 x USB 3.0, 1 x USB 2.0.	1 x USB 3.0, 1 x USB 2.0.	1 x USB host, 1 x USB OTG.
Puertos de Video	1 x HDMI.	2 x micro HDMI	HDMI y DisplayPort.	HDMI.	N.A.
Pines GPIO	40 pines GPIO.	40 pines GPIO.	40 pines GPIO.	65 pines GPIO.	20 pines GPIO.
PRECIO COP	350000	40000	1130000	360000	300000

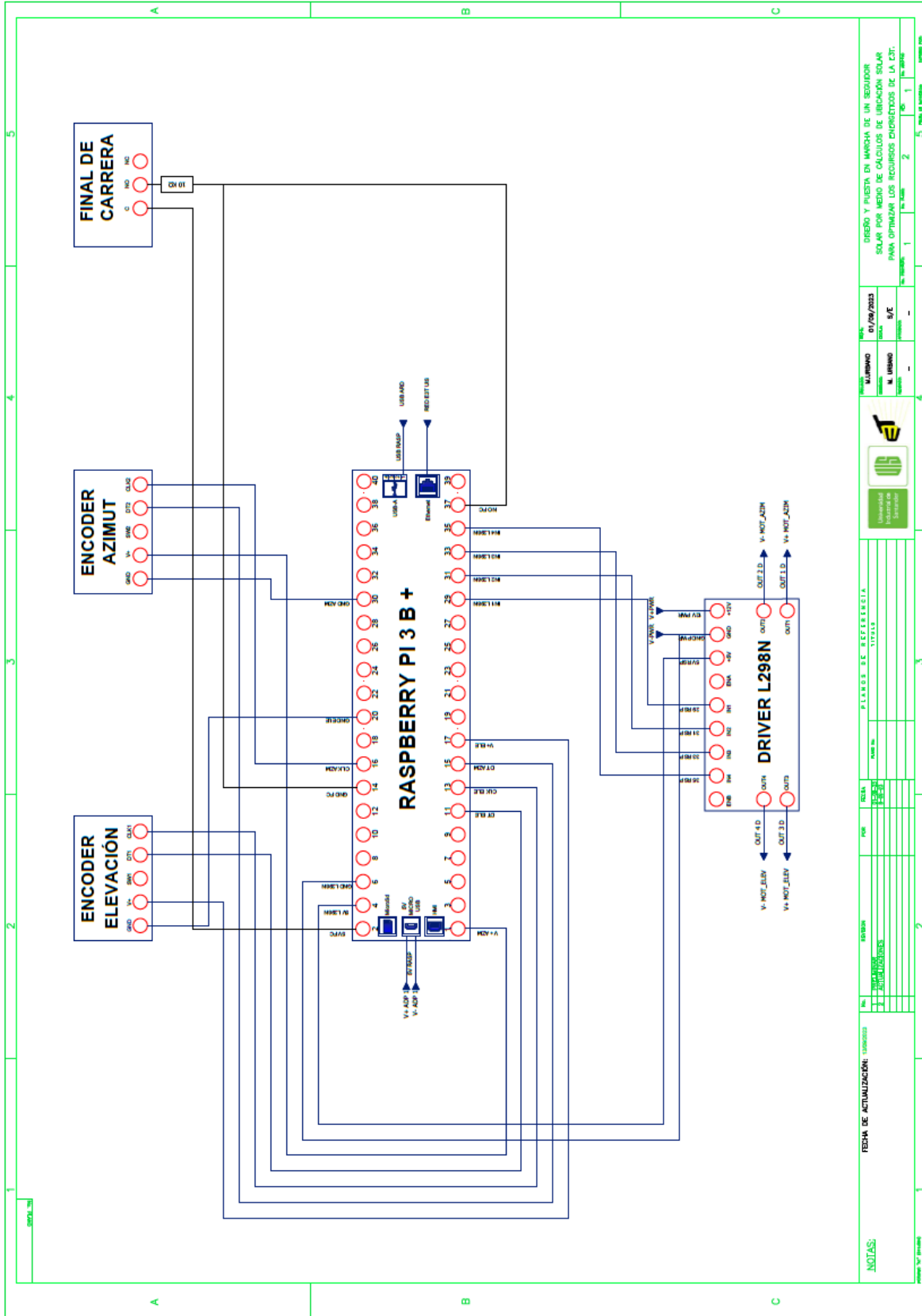
Apéndice E. Comparación para la elección de Driver L298N.

Característica	L293D	L298N	BTS7960
Tipo de motor	Controlador de motor DC (corriente continua) y motores paso a paso.	Controlador de motor DC (corriente continua) y motores paso a paso.	Controlador de motor DC (corriente continua).
Corriente Máxima por Canal	Hasta 600 mA (1,2 A en picos) por canal.	Hasta 2 A por canal (hasta 4 A en picos) en el L298N básico, pero existen variantes con corrientes mayores.	Hasta 43 A (según la versión y la disipación de calor).
Canales	4 canales independientes para controlar hasta 2 motores DC bidireccionales o 2 motores paso a paso unipolares/bipolares.	2 canales para controlar hasta 2 motores DC bidireccionales o 1 motor paso a paso bipolar.	2 canales para controlar dos motores DC de corriente continua
Tensión de alimentación	De 4,5 V a 36 V.	De 5 V a 35V.	De 5 V a 27 V.
Protección Térmica	Sí (apagado automático en caso de sobrecalentamiento).	Sí (apagado automático en caso de sobrecalentamiento).	Sí (protección contra sobrecalentamiento).
Control de Sentido de Giro	Sí (permite controlar la dirección de giro de los motores).	Sí (permite controlar la dirección de giro de los motores).	Sí (permite controlar la dirección de giro del motor).
Compatibilidad con Arduino y Microcontroladores	Ampliamente compatible con microcontroladores como Arduino	Ampliamente compatible con microcontroladores como Arduino.	Puede utilizarse con microcontroladores como Arduino.
Modulación de Ancho de Pulso (PWM)	SI	SI	SI
PRECIO COP	12000	20000	45000

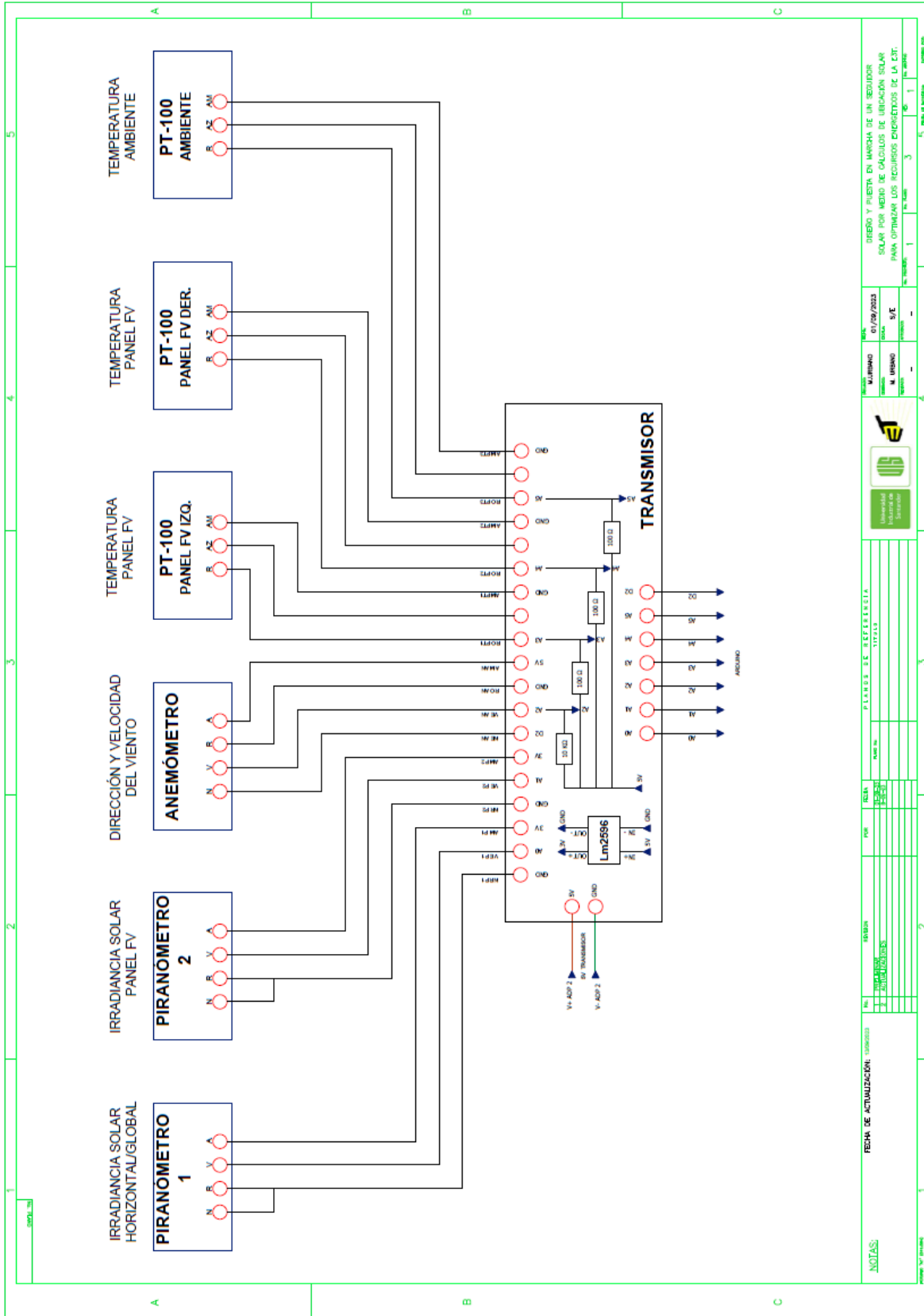
Apéndice F. Diseño preliminar y planos eléctricos del sistema de control del seguidor solar.



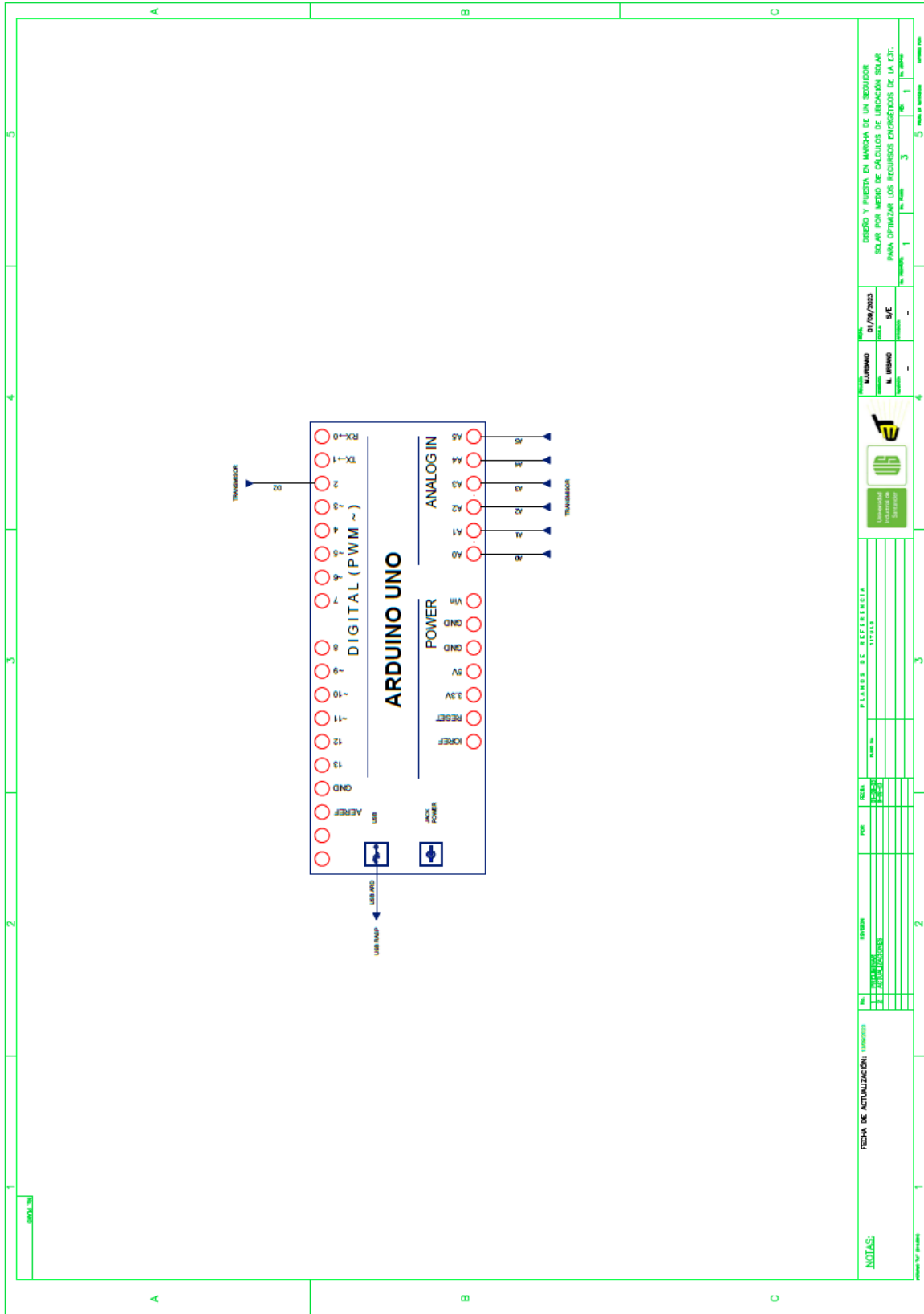




FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 10/03/2023		REVISIÓN: 1		AUTOR: M. URBANO		PROYECTO: S/E		DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UN SEGUIDOR SOLAR POR MEDIO DE CALCULOS DE UBICACIÓN SOLAR PARA OPTIMIZAR LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DE LA CDT.	
NOTAS:		PLANO DE REFERENCIA: TITULO		M. URBANO		M. URBANO		M. URBANO	
FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 10/03/2023		REVISIÓN: 1		AUTOR: M. URBANO		PROYECTO: S/E		DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UN SEGUIDOR SOLAR POR MEDIO DE CALCULOS DE UBICACIÓN SOLAR PARA OPTIMIZAR LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DE LA CDT.	
FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 10/03/2023		REVISIÓN: 1		AUTOR: M. URBANO		PROYECTO: S/E		DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UN SEGUIDOR SOLAR POR MEDIO DE CALCULOS DE UBICACIÓN SOLAR PARA OPTIMIZAR LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DE LA CDT.	



FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 13/06/2023		REVISOR: M. URIBINO		DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UN SEGUIDOR SOLAR POR MEDIO DE CALCULOS DE UBICACIÓN SOLAR PARA OPTIMIZAR LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DE LA EXT.	
NOTAS:	REVISOR: M. URIBINO	FECHA: 13/06/2023	PROYECTO: S/E	NO. DE HOJA: 3	TOTAL DE HOJAS: 5
PLANO S.E. EFICIENCIA		UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ		CÓDIGO DE PROYECTO: 15	



ORDEN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SEGUIDOR SOLAR POR MEDIO DE CALCULO DE LIBERACION SOLAR PARA OPTIMIZAR LOS RECURSOS DISPONIBLES DE LA EST.

NUMERO 01/20/2023
M. LIBERACION
M. LIBERACION



PLANO DE REFERENCIA
117443

FECHA: 03/03/2023
POR: [Signature]

FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 03/03/2023
DESCRIPCIÓN: ACTUALIZACIÓN

NOTAS:

FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 03/03/2023
DESCRIPCIÓN: ACTUALIZACIÓN

FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 03/03/2023
DESCRIPCIÓN: ACTUALIZACIÓN

FECHA DE ACTUALIZACIÓN: 03/03/2023
DESCRIPCIÓN: ACTUALIZACIÓN

Apéndice G. Ecuaciones útiles para cálculos de posición solar.**Ecuaciones de Kepler:**

Las ecuaciones keplerianas son un conjunto de tres ecuaciones fundamentales que describen el movimiento de un objeto en una órbita elíptica alrededor de otro objeto bajo la influencia de la gravedad. Estas ecuaciones fueron formuladas por Johannes Kepler en el siglo XVII y son cruciales en la comprensión de los movimientos planetarios y la dinámica de sistemas astronómicos.

Primera Ley de Kepler (Ley de las órbitas elípticas):

La ecuación que describe una órbita elíptica es:

$$r = \frac{p}{1 + e * \cos(\theta)}$$

Donde:

r es la distancia entre el objeto en órbita y el objeto central (por ejemplo, la distancia entre un planeta y el Sol).

p es el parámetro de la elipse, que está relacionado con la longitud del semi latus rectum (un valor fijo para una órbita elíptica).

e es la excentricidad de la elipse, que mide cuán achatada está la órbita ($0 \leq e < 1$).

θ es el ángulo polar que varía a medida que el objeto en órbita se desplaza a lo largo de su trayectoria.

Segunda Ley de Kepler (Ley de las áreas iguales):

Esta ley no se expresa en una ecuación única, pero se refiere al hecho de que un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales mientras se desplaza a lo largo de su órbita. Esto significa

que la velocidad del planeta varía a lo largo de su órbita de tal manera que barre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales.

Tercera Ley de Kepler (Ley de los períodos):

Esta ley se expresa matemáticamente como:

$$\frac{\tau_1^2}{r_1^3} = \frac{\tau_2^2}{r_2^3}$$

Donde:

T1 y T2 son los períodos orbitales de dos objetos en órbita (por ejemplo, dos planetas).

R1 y R2 son las distancias promedio entre cada objeto y el objeto central (por ejemplo, el Sol) en sus respectivas órbitas.

Ecuaciones de nutación:

es constante para todos los objetos en órbita alrededor del mismo objeto central.

Esta ecuación establece que el cociente de los cuadrados de los períodos y las distancias promedio. Las ecuaciones de nutación son utilizadas en astronomía para describir las pequeñas variaciones en la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto a su órbita alrededor del Sol. Estas variaciones se deben principalmente a la influencia de la Luna y el Sol, y son importantes para la determinación precisa de la posición de las estrellas y otros objetos celestes. Aquí están las ecuaciones de nutación:

Ecuación de la nutación en longitud eclíptica ($\Delta\psi$):

La nutación en longitud eclíptica, denotada como $\Delta\psi$, describe la variación en la longitud eclíptica de los objetos celestes debido a la nutación. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta\psi = \sum A \cdot \sin(B \cdot t + C)$$

Donde:

$\Delta\psi$ es la nutación en longitud eclíptica.

A, B y C, son coeficientes que dependen de las características de la órbita de la Luna y el Sol.

t es el tiempo en términos de unidades de tiempo adecuadas (por ejemplo, días).

Ecuación de la nutación en oblicuidad eclíptica ($\Delta\varepsilon$):

La nutación en oblicuidad eclíptica, denotada como $\Delta\varepsilon$, describe la variación en la inclinación del eje de la Tierra con respecto a la eclíptica. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta\varepsilon = \sum D * \cos \cos (E * t + F)$$

Donde:

$\Delta\varepsilon$ es la nutación en oblicuidad eclíptica.

D, E, F son coeficientes que también dependen de las características orbitales del Sol.

t es el tiempo en unidades apropiadas.

Ecuaciones de precesión:

Las ecuaciones de precesión describen el lento cambio en la orientación del eje de rotación de la Tierra a lo largo de un período de tiempo largo debido a varias influencias gravitatorias, como la fuerza ejercida por el Sol y la Luna en la protuberancia ecuatorial de la Tierra. Estas ecuaciones son esenciales para mantener la precisión en la determinación de las posiciones de las estrellas y otros objetos celestes a lo largo de las eras geológicas. Aquí están las ecuaciones de precesión:

Precesión de los equinoccios ($\Delta\psi$):

La precesión de los equinoccios se refiere al lento movimiento de los puntos donde la eclíptica cruza el ecuador celeste, conocidos como equinoccios. Puede expresarse mediante la ecuación:

$$\Delta\psi = \sum A * \cos \cos (B * t)$$

Donde:

$\Delta\psi$ es la precesión de los equinoccios.

A, B son coeficientes que dependen de las características orbitales de varios cuerpos celestes, como el Sol y la Luna.

t es el tiempo en unidades adecuadas.

Precesión de la oblicuidad ($\Delta\varepsilon$):

La precesión de la oblicuidad se refiere al cambio gradual en la inclinación del eje de la Tierra en relación con la eclíptica. Puede expresarse mediante la ecuación:

$$\Delta\varepsilon = \sum D * \sin \sin (D * t)$$

Donde:

$\Delta\varepsilon$ es la precesión de la oblicuidad.

C, D son coeficientes que también dependen de las características orbitales de varios cuerpos celestes.

t es el tiempo en unidades adecuadas.

Apéndice H. Plan de mantenimiento del seguidor solar

El siguiente plan de mantenimiento para el seguidor solar es esencial para asegurar su funcionamiento eficiente y prolongar su vida útil. Su objetivo principal es garantizar el correcto funcionamiento del seguidor solar, maximizar su eficiencia y prolongar su vida útil mediante la realización de actividades de inspección, limpieza y ajustes de periódicos.

Frecuencia de Mantenimiento:

Mantenimiento diario:

- Inspeccionar visualmente el sistema en busca de daños evidentes o problemas operativos.
- Verificar el estado de los componentes eléctricos y conexiones.
- Registrar cualquier anomalía o error en el funcionamiento.

Mantenimiento semanal:

- Comprobar el alineamiento del seguidor solar y su capacidad para seguir la trayectoria solar de manera precisa.
- Llevar un registro de la producción de energía para detectar posibles disminuciones en la eficiencia.

Mantenimiento mensual:

- Limpiar los paneles solares de polvo, suciedad y otros contaminantes.
- Inspeccionar el estado de los cables y conexiones eléctricas, asegurándose de que estén en buen estado.
- Comprobar que los sensores y dispositivos de control funcionen correctamente.

Mantenimiento trimestral

- Lubricar los componentes móviles, como los rodamientos y las partes mecánicas del seguidor solar, si es necesario.
- Verificar que los sistemas de seguridad, como el sistema de parada de emergencia, funcione correctamente.
- Realizar una prueba de funcionamiento completo del seguidor solar y su sistema de control.

Mantenimiento anual:

- Realizar una revisión exhaustiva de todos los componentes, incluyendo motores, engranajes, sensores y controladores.
- Realizar una calibración completa del seguidor solar.
- Reemplazar cualquier componente desgastado o dañado.
- Actualizar el software de control si es necesario.

Registros de Mantenimiento:

- Llevar registros detallados de todas las actividades de mantenimiento realizadas, incluyendo fechas, resultados de inspecciones, reparaciones efectuadas y cualquier otro dato relevante.

Personal Responsable:

- Designar a un técnico o equipo de mantenimiento responsable de llevar a cabo las actividades de mantenimiento de acuerdo con el plan establecido.

Documentación:

- Disponer de documentación técnica para consulta en caso de dudas o necesidades de referencia durante las actividades de mantenimiento.

Apéndice I. Código de control y monitorización de datos

https://github.com/Dagago02/SolarTracker_N.git

Este código es un programa para un rastreador solar de dos ejes, que utiliza dos potenciómetros para medir el azimut y la elevación del sol.

El programa funciona de la siguiente manera:

Primero, el programa configura los pines GPIO para los dos potenciómetros y los cuatro motores. Esto se hace para que el programa pueda leer los valores de los potenciómetros y enviar señales a los motores.

Luego, el programa crea dos hilos para ejecutar los bucles de lectura de los potenciómetros. Esto permite que el programa lea los valores de los potenciómetros de forma simultánea.

En el bucle principal del programa, el programa calcula la elevación y el azimut del sol en función de la hora y la fecha actuales. Esto se hace utilizando la biblioteca pvlb.

Luego, el programa lee los valores de los potenciómetros y los compara con la elevación y el azimut del sol. Esto se hace utilizando la función comparador ().

En función de los resultados de la comparación, el programa envía señales a los motores para mover el panel solar hasta que esté orientado directamente hacia el sol.

El código también incluye un archivo de texto llamado Potenciometros.txt, que se utiliza para almacenar los valores actuales de los potenciómetros. Esto permite que el programa reanude su funcionamiento desde donde se quedó si se interrumpe.

Espero que este párrafo haya ayudado a explicar cómo funciona el código.

Si tienes alguna pregunta, no dudes en preguntarme.

Además de lo explicado anteriormente, me gustaría añadir que el código es bastante sencillo de entender.

Los comentarios que he incluido explican cada paso del código, por lo que debería ser fácil de seguir.

También he incluido un archivo de texto llamado README.md, que explica el código de forma más detallada.

Apéndice J. Código utilizado para la monitorización de variables microclimáticas

El código mostrado a continuación se divide en 3 partes:

- **Parte 1 Piranómetros:** Este código es un programa de Arduino que realiza mediciones de irradiancia utilizando dos piranómetros conectados a los pines analógicos A0 y A1. Se leen las señales analógicas de ambos piranómetros, se calcula la irradiancia en base a los valores de tensión ya que los piranómetros arrojan valores de tensión y lo que hace el código es leer en los pines analógicos y convertir la relación a irradiancia y se imprime la medición en el puerto serial. El programa espera 60 segundos entre cada medición. Los resultados se presentan indicando la irradiancia en vatios por metro cuadrado (W/m^2) para ambos piranómetros.

- **Parte 2 Anemómetro y Veleta:** Este código en Arduino se utiliza para medir la velocidad del viento con un anemómetro y la dirección del viento con una veleta. El código inicializa variables y configuraciones, como el conteo de pulsos y el pin de entrada para los pulsos. Luego, en el bucle principal, realiza las siguientes acciones: calcula la velocidad del viento en metros por segundo a partir de los pulsos y la muestra. Además, mide la resistencia eléctrica en un pin analógico usando un divisor de tensión. Este método funciona gracias a que se le ingresan 5V y un valor de resistencia conocido. Luego, se mide la tensión con el pin analógico, lo que nos da el valor aproximado de resistencia. Con este valor, se puede calcular el ángulo correspondiente en grados y mostrarlo.

- **Parte 3 Termocuplas:** Este código funciona principalmente con una librería llamada *one wire* la cual proporciona para las curvas para leer las temperaturas, luego se hace un arreglo de los

pinos digitales D3 D4 D5 el cual con una funcion llamada *get temp* adecua la medicion realizada y la presenta en forma de grados centigrados

<https://github.com/mrgorkyy/microclimaticas/tree/3e77ff263f0f3d1584f6fca46e2b5cb859>

[9b6921](#)

Apéndice K. Medición de azimut y elevación del panel FV con respecto a la ubicación del sol, para el día 18 de noviembre 2023

Hora	Sun Locator[°]		Angle Meter [°]		Seguidor Solar[°]	
	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación	Azimut	Elevación
08:00	117,3	30,4	121	30	117,49	30,85
08:15	118,8	33,6	121	30	119,08	34,12
08:30	120,6	36,8	148	30	120,89	37,35
08:45	122,6	40	148	30	122,95	40,51
09:00	124,9	43,1	148	30	125,31	43,59
09:15	127,5	46,1	148	30	128,01	46,58
09:30	130,5	49	148	30	131,11	49,45
09:45	134	51,7	148	30	134,69	52,17
10:00	138,1	54,3	148	30	138,83	54,72
10:15	151,83	63,17	148	30	143,59	57,06
10:30	159,24	62,18	148	30	149,04	59,12
10:45	160,03	60,74	183	43	155,21	60,86
11:00	168,1	61,45	183	43	162,09	62,22
11:15	173,43	62,9	183	43	169,55	63,13
11:30	180,08	62,85	183	43	177,40	63,55
11:45	188,11	60,14	183	43	185,34	63,46
12:00	195,61	58,78	183	43	193,08	62,86
12:15	205,63	57,34	183	43	200,36	61,78
12:30	210,26	55,12	183	43	206,99	60,28
12:45	215,56	53,35	208	30	212,91	58,42
13:00	220,57	51,97	208	30	218,10	56,25
13:15	225,33	50,53	208	30	222,63	53,84
13:30	234,89	49,76	208	30	226,55	51,22
13:45	242,26	46,08	208	30	229,96	48,44
14:00	245,48	42,9	208	30	232,91	45,52
14:15	246,55	40,71	208	30	235,48	42,50
14:30	247,51	37,5	208	30	237,72	39,39
14:45	248,35	34,8	208	30	239,69	36,20
15:00	249,1	33,45	238	30	241,41	32,96
15:15	249,75	30,5	238	8	242,94	29,67
15:30	250,32	26,8	238	8	244,28	26,33
15:45	250,81	23,4	238	8	245,47	22,96
16:00	251,23	18,03	238	8	246,52	19,55

Nota: En la tabla se suministra información de azimut y elevación aportada por *SUNLOCATOR*,

ANGLE METER y *SEGUIDOR SOLAR* respectivamente.