



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE RASTREO SOLAR DE
DOBLE EJE PARA ACOPLAMIENTO EN PANELES
FOTOVOLTAICOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Marlon Alexander Barriga Palacios
Henry Stanley Chancusing Maldonado
TUTOR: Alberto Santiago Ramírez Farfán

Guayaquil - Ecuador
2025

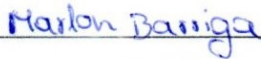
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Marlon Alexander Barriga Palacios** con documento de identificación N° **1250705041** y **Henry Stanley Chancusing Maldonado** con documento de identificación N° **0956134845**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 7 de Febrero del año 2025

Atentamente,



Marlon Alexander Barriga Palacios
1250705041



Henry Stanley Chancusing Maldonado
0956134845

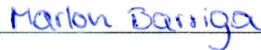
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Marlon Alexander Barriga Palacios** con documento de identificación N° **1250705041** y **Henry Stanley Chancusing Maldonado** con documento de identificación N° **0956134845**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE RASTREO SOLAR DE DOBLE EJE PARA ACOPLAMIENTO EN PANELES FOTOVOLTAICOS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 7 de febrero del año 2025

Atentamente,



Marlon Alexander Barriga Palacios
1250705041



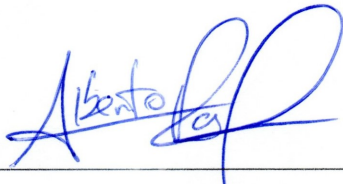
Henry Stanley Chancusing Maldonado
0956134845

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Alberto Santiago Ramírez Farfán**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE RASTREO SOLAR DE DOBLE EJE PARA ACOPLAMIENTO EN PANELES FOTOVOLTAICOS**, realizado por **Marlon Alexander Barriga Palacios** con documento de identificación N° **1250705041** y por **Henry Stanley Chancusing Maldonado** con documento de identificación N° **0956134845**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 7 de febrero del año 2025

Atentamente,



Ing. Alberto Santiago Ramírez Farfán, Mg.
0923348890

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres, el cual son mi primera escuela y me inculcaron los valores necesarios para poder llegar hasta aquí, me compartieron las enseñanzas de la vida, y de lo mucho que hay que batallar para conseguir un sueño.

También dedico este trabajo a cada uno de los amigos, familiares y profesores que me acompañaron en el transcurso de mis estudios, me brindaron su apoyo y me compartieron sus enseñanzas para poder seguir hacia adelante.

Marlon Alexander Barriga Palacios

En primer lugar agradezco a Dios porque el a sido mi fortaleza, quien me ha ayudado mucho en mi vida, no solo para mi, si no también para mi familia. Este trabajo de titulación está dedicado a mi padre Henry Chancusing, que fue una inspiración para mi, que desde pequeño lo observaba como arreglaba cosas electrónicas, esto me motivo a elegir esta carrera, le agradezco por su esfuerzo y sacrificio para poder culminar mi carrera universitaria. A mi madre Viviana Maldonado, mi guía y mi mayor apoyo. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía, por tus sacrificios y por enseñarme que con esfuerzo y amor todo es posible. A mis hermanos, Andrea, Daniel, Luis Miguel y mi abuelita Nancy, gracias por cada palabra de aliento, por los momentos de risas que aliviaron el estrés y por ser mi inspiración para seguir adelante. A mi enamorada Valery, por cada palabra de aliento, por los momentos de complicidad, por ser mi refugio en los días más difíciles, gracias por ser parte del proceso. A mis mascotas, las que están y las que ya no, gracias por ser parte de mi vida y de mi camino. Su amor y compañía fueron un regalo que atesoro siempre.

Dedico esta investigación a toda mi familia, que me han enseñado que el mejor regalo que se puede dar en la vida es la educación, el cual es un puente que nos permite aprender e innovar a nuevos mundos en donde los sueños son posibles.

Henry Stanley Chancusing Maldonado

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento primera mente a Dios, por permitirme seguir adelante y brindarme las fuerzas necesarias de llegar hasta a aquí y también le agradezco por las veces que me cuidó en las largas noches de viaje de regreso de la universidad. Agradezco a mis padres por su compañía y apoyo además de su amor incondicional. También agradezco a mi tutor de tesis el Ing. Alberto Ramírez por su paciencia en este proyecto. A los docentes agradezco sus enseñanzas y sus consejos de como mejorar como ingeniero y a mis amigos por su compañía y apoyo.

Marlon Alexander Barriga Palacios

Agradezco a los docentes de la carrera de ingeniería mecatrónica que han formado parte de mi formación profesional, quienes con su conocimiento y su apoyo brindaron las herramientas para un futuro exitoso como un ingeniero mecatrónico.

Agradezco a mis amigos que me dio la universidad, porque me han demostrado ser grandes seres humanos que siempre me han brindado de su apoyo aun cuando fue difícil avanzar, por acompañarme y hacer de este camino más agradable y enriquecedor.

Henry Stanley Chancusing Maldonado

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es mejorar la producción de energía de un panel solar a través de un seguidor solar de dos ejes. Este sistema inteligente orienta el panel de forma dinámica hacia el sol, garantizando una exposición óptima en todo momento. En comparación con los sistemas estáticos, este enfoque promete una mayor eficiencia y un aprovechamiento superior de la energía solar. El rastreador cuenta con un mecanismo de movimiento preciso que abarca 180° en el plano horizontal y 90° en el vertical.

Se empleó un microcontrolador ESP32 Dev Module, cuatro sensores ldr para medir la luz del sol y un sensor de voltaje FZ0430 para monitorear el rendimiento del panel solar. La solución ofrece la conectividad mediante IoT y la plataforma de Arduino Cloud, la interfaz gráfica en Python que permite la monitorización del proceso y ver cómo el rastreador sigue el sol, enviando las alarmas a través de la interfaz.

Además, el sistema integra un algoritmo de control optimizado que ajusta la orientación del panel en tiempo real, minimizando el consumo energético de los motores y maximizando la captación de radiación solar. La combinación de hardware eficiente y software inteligente permite mejorar la autonomía del sistema, lo que lo hace ideal para aplicaciones en zonas con recursos energéticos limitados. Así mismo, la conectividad IoT facilita el análisis de datos en la nube, posibilitando ajustes remotos y optimización del rendimiento a lo largo del tiempo.

Palabras claves: Sistema de rastreo solar, paneles fotovoltaicos, doble eje, ESP32 Dev Module, sensores LDR, radiación solar, Arduino Cloud, conectividad IoT, eficiencia energética, interfaz gráfica Python.

ABSTRACT

The objective of this project is to create a two-axis solar tracker that helps improve the energy production of a solar panel. To achieve this, the system constantly adjusts the position of the panel so that it is always facing the sun. This design seeks to be more efficient than fixed systems. It has a mechanism that allows the panel to be moved precisely, rotating up to 180° horizontally (azimuth) and up to 90° vertically.

To make the prototype, a combination of hardware and software was used. An ESP32 Dev Module microcontroller, four sensors with photoresistors to measure sunlight, and an FZ0430 voltage sensor to monitor the performance of the solar panel were used. The solution offers connectivity through IoT and the Arduino cloud, the graphical interface in Python that allows monitoring the process and seeing how the tracker follows the sun, sending alarms through the interface.

Keywords: Solar tracking system, photovoltaic panels, dual axis, ESP32 Dev Module, LDR sensors, solar radiation, Arduino Cloud, IoT connectivity, energy efficiency, Python graphical interface.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
II.	Problema	2
III.	Justificación	3
IV.	Objetivos	4
IV-A.	Objetivo general	4
IV-B.	Objetivos específicos	4
IV-C.	Matriz de objetivos	4
V.	Fundamentos Teóricos	5
V-A.	Trayectoria de rayos solares	5
V-A1.	Cálculo de ángulos de inclinación y elevación	5
V-A2.	Ángulo de Elevación Solar	5
V-A3.	Tiempo estándar del meridiano de Greenwich (LSTM)	5
V-A4.	Factor de corrección de tiempo	5
V-A5.	Tiempo solar y ángulo horario	5
V-A6.	Azimut y elevación	5
V-B.	Radiación solar	5
V-C.	Paneles Solares	6
V-D.	Conversión de radiación solar en energía eléctrica en paneles fotovoltaicos	7
V-D1.	Fórmulas para la conversión de radiación en energía eléctrica	7
V-E.	Paneles Solares monocristalinos y policristalinos	8
V-F.	Planteamiento y definición de un seguidor solar	8
V-G.	Posición geográfica en relación al ecuador.	8
V-H.	Mecanismo y composición para un sistema de rastreo solar	9
V-H1.	Tipos de seguidores	9
V-H2.	Tipos de mecanismos	9
V-I.	Arduino iot cloud	9
V-I1.	Plataformas similares a Arduino IoT Cloud	10
V-I2.	Que es una plataforma en la nube	10
V-J.	Microcontrolador ESP32	10
V-J1.	Características de la ESP32	10
V-K.	Módulo LDR	11
V-K1.	Tipos de detección del LDR	11
V-K2.	Tipos de sensores	11
V-K3.	Clasificación por Linealidad	12
V-L.	Sensor de voltaje	12
V-L1.	Especificaciones del sensor de voltaje	12
V-L2.	Esquema de conexiones	12
V-L3.	Aplicaciones del sensor de voltaje	12
V-L4.	Compatibilidad del Sensor FZ0430 con Microcontroladores	12
V-M.	Driver L298N	13
V-M1.	Aplicaciones del Driver L298N	13
V-M2.	Especificaciones técnicas	13
V-M3.	Esquema eléctrico del Driver L298N	14
V-M4.	Comparación con otros Drivers	14
V-N.	Motor DC 12V - JGY-370	14

	V-N1.	Lugares de aplicaciones del Motor DC 12V - JGY-370	14
	V-N2.	Limitaciones de uso del motor JGY-370	15
V-Ñ.		Fuente conmutada de 12v a 12.5A	15
	V-Ñ1.	Funcionamiento de las etapas de una fuente conmutada	15
	V-Ñ2.	Aplicación de la fuente	16
V-O.		Controlador solar	16
	V-O1.	Controladores de carga PWM	16
	V-O2.	Controladores de carga MPPT	16
	V-O3.	Aplicaciones del controlador MPPT y PWM en sistemas solares	17
V-P.		Batería	17
	V-P1.	Tipos de baterías y sus características	17
	V-P2.	Baterías de Plomo-Ácido (Pb-ácido)	17
	V-P3.	Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd)	17
	V-P4.	Baterías de Hidruro Metálico de Níquel (Ni-MH)	18
	V-P5.	Baterías de Iones de Litio (Li-Ion)	18
	V-P6.	Baterías de Polímero de Litio (Li-Po)	18
	V-P7.	El ciclo de vida de una batería y su proceso de carga	18
VI.	Marco Metodológico		19
	VI-A.	Arquitectura General del Sistema de Seguimiento Solar	19
		VI-A1. Descripción General del Sistema	19
		VI-A2. Flujo Operativo del Sistema de Seguimiento Solar	19
		VI-A3. Secuencia Temporal de Operaciones del Sistema	20
	VI-B.	Diseño de estructura del seguidor solar	21
	VI-C.	Análisis estructural del seguidor solar	22
	VI-D.	Aplicación de la fuerza sobre la estructura	22
	VI-E.	Diseño e Implementación del Hardware	24
		VI-E1. Sistema de Motorización	24
		VI-E2. Sistema de Sensores	25
		VI-E3. Componentes Electrónicos y su Interconexión	25
		VI-E4. Integración del Microcontrolador ESP32	25
	VI-F.	Desarrollo del Sistema de Control	26
		VI-F1. Máquina de Estados para el Control del Sistema	26
		VI-F2. Control de Motores	27
		VI-F3. Algoritmos de Control	27
		VI-F4. Protocolo de Comunicación entre Componentes	29
	VI-G.	Arquitectura e Implementación del Software	29
		VI-G1. Estructura de Clases del Sistema Integrado	29
		VI-G2. Diseño Orientado a Objetos del Sistema	30
		VI-G3. Integración con Plataforma IoT Arduino Cloud	31
		VI-G4. Sistema de Monitoreo y Control en Python	32
	VI-H.	Desarrollo de la Interfaz de Usuario	34
VII.	Resultados		35
	VII-A.	Análisis estático	35
		VII-A1. Estudio de tensión Von Mises	35
	VII-B.	Análisis de desplazamiento	35
	VII-C.	Análisis de deformación	36
	VII-D.	Análisis factor de seguridad	37
	VII-E.	Análisis de la interacción del viento sobre la estructura	38

VII-F.	Montaje Final del Seguidor Solar: Sistema Completo y en Funcionamiento	39
VII-G.	Conexiones de los componentes del seguidor solar en la pcb	39
VII-H.	Ejecución y visualización de la plataforma Arduino Cloud IoT para el monitoreo del seguidor solar.	40
VII-I.	Ejecución y visualización de la interfaz gráfica realiza en Python Thonny para el monitoreo del seguidor solar	40
VII-J.	Análisis de datos del seguidor solar en entorno real	41
VIII.	Cronograma	47
IX.	Presupuesto	48
X.	Conclusiones	49
XI.	Recomendaciones	49
	Referencias	50
XII.	Anexo A: Código de python para análisis de rendimiento de seguidor solar vs panel solar fijo	53
XIII.	Anexo B: Código de Matlab para análisis de rendimiento de seguidor solar vs panel solar fijo	57
XIV.	Anexo C: Diseño de soporte de seguidor solar en solidworks 2024	60
XV.	Anexo D: Proceso de construcción de Seguidor Solar	67
XVI.	Anexo E: Diseño de PCB para ESP32 Wroom	71
XVII.	Anexo F: Soldado de componentes de la Pcb	72
XVIII.	Anexo G: Diseño y circuito del panel fijo hecho en baquelita perforada	73
XIX.	Anexo H: Especificaciones de Motor JGY-370	74

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Potencial fotovoltaico en Ecuador [17].	7
2.	Sistema de coordenadas geográficas [25].	9
3.	Plataforma Arduino Cloud IoT [30].	10
4.	Pines del microcontrolador ESP32 [33].	11
5.	Función y simbología del LDR [35].	11
6.	Divisor de voltaje [39].	12
7.	Diagrama del Circuito Interno del Driver L298N [45].	14
8.	Etapas de fuente conmutada[37].	16
9.	Diagrama de Flujo del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	20
10.	Diagrama de Línea de Tiempo del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	21
11.	Diseño del seguidor solar. Fuente: Autores.	21
12.	Información del modelo. Fuente: Autores.	22
13.	Mallado de la estructura. Fuente: Autores.	23
14.	Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema. Fuente: Autores.	23
15.	Selección de puntos de movimiento de la estructura. Fuente: Autores.	24
16.	Aplicación de carga ejercida sobre la estructura. Fuente: Autores.	24
17.	Diagrama de Arquitectura de Componentes Electrónicos del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	25
18.	Diagrama de conexiones de los elementos con el ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	26
19.	Diagrama de Máquina de Estados del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	27
20.	Diagrama de Árbol de Decisiones para el Control de Motores del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	28
21.	Diagrama de Relación entre Entidades del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	29
22.	Diagrama de Secuencia de Comunicación del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	29
23.	Diagrama de Clases del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.	30
24.	Diagrama de Clases, Diseño de Arquitectura Orientada a Objetos para un Sistema de Seguimiento Solar. Fuente: Autores.	30
25.	Diagrama de Estados Flujo Operativo del Sistema de Seguimiento Solar con Monitoreo en Tiempo Real. Fuente: Autores.	31
26.	Diagrama de Secuencia Interacción entre Componentes del Sistema Solar Basado en Arduino Cloud y Python. Fuente: Autores.	32
27.	Diagrama de Componentes Arquitectura Modular del Sistema de Seguimiento Solar con Integración de Hardware y Software. Fuente: Autores.	33
28.	Diagrama de Flujo de Procesamiento de datos y Visualización de Información en Tiempo Real para el Seguimiento Solar. Fuente: Autores.	34
29.	Análisis estático de Von Mises en la estructura del seguidor solar. Fuente: Autores.	35
30.	Análisis de desplazamiento de la estructura. Fuente: Autores.	36
31.	Análisis de deformación de la estructura. Fuente: Autores.	36
32.	Análisis de factor de seguridad. Fuente: Autores.	37
33.	Diagrama de flujo de aire a 30 km/h. Fuente: Autores.	38
34.	Montaje del seguidor solar. Fuente: Autores.	39
35.	Conexiones en la pcb. Fuente: Autores.	39
36.	Plataforma de monitoreo Arduino Cloud IoT. Fuente: Autores.	40
37.	Ejecución del Código en python. Fuente: Autores.	40
38.	Interfaz Gráfica en python. Fuente: Autores.	41
39.	Análisis Comparativo de Voltajes y Corrientes. Fuente: Autores.	41
40.	Comparación de Potencia Generada (Media Móvil). Fuente: Autores.	42
41.	Potencia Promedio Diaria. Fuente: Autores.	42
42.	Corriente Máxima Diaria. Fuente: Autores.	43
43.	Distribución de Eficiencia Relativa por Hora. Fuente: Autores.	43
44.	Eficiencia Relativa del Seguidor Solar. Fuente: Autores.	44

45.	Eficiencia Relativa Diaria. Fuente: Autores.	44
46.	Distribución de Diferencias de Potencia. Fuente: Autores.	45
47.	Correlación entre Intensidad de Luz y Potencia. Fuente: Autores.	45
48.	Energía Acumulada Diaria. Fuente: Autores.	46
49.	Base del seguidor solar. Fuente: Autores.	60
50.	Soporte para base de motores. Fuente: Autores.	61
51.	Soporte del motor de rotación horizontal 340 grados. Fuente: Autores.	62
52.	Base del soporte para el motor vertical. Fuente: Autores.	63
53.	Soporte del motor de rotación vertical 120 grados. Fuente: Autores.	64
54.	Pieza de encaje LDR. Fuente: Autores.	65
55.	Mesa de apoyo de los paneles. Fuente: Autores.	66
56.	Conexiones de componentes. Fuente: Autores.	67
57.	Pruebas de funcionamiento. Fuente: Autores.	67
58.	Cableado mal estructurado. Fuente: Autores.	68
59.	Cableado de LDRS, ordenados y aislados. Fuente: Autores.	68
60.	Distribución de cables en el interior de la caja. Fuente: Autores.	69
61.	Cableado optimizado y correctamente acomodado en el interior de la caja. Fuente: Autores.	69
62.	Instalación del seguidor solar sobre la mesa. Fuente: Autores.	70
63.	Instalación del seguidor solar y panel fijo sobre la mesa de pruebas para recopilación de datos. Fuente: Autores.	70
64.	Diseño de conexiones del sistema. Fuente: Autores.	71
65.	Diseño de PCB. Fuente: Autores.	71
66.	Pcb de fibra con antisolder. Fuente: Autores.	72
67.	Soldado de pcb terminado. Fuente: Autores.	72
68.	Diseño de conexiones del panel fijo. Fuente: Autores.	73
69.	Componentes para el monitoreo del voltaje del panel fijo. Fuente: Autores.	73
70.	Dimensiones del motor [48].	74
71.	Especificaciones del motor [48].	74

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Matriz de los objetivos planteados	4
II.	Características técnicas [38].	13
III.	Especificaciones del Driver L298N [44].	13
IV.	Especificaciones del motorreductor [48].	15
V.	Especificaciones de fuente conmutada [51].	15
VI.	Selección de tipo de controlador según paneles y baterías [55]	17
VII.	Especificaciones de Motores.	24
VIII.	Sensores LDR. Fuente: Autores.	25
IX.	Conexiones del ESP32. Fuente: Autores.	25
X.	Alimentación y Voltaje. Fuente: Autores.	26
XI.	Parámetros de Control PWM. Fuente: Autores.	27
XII.	Estados del Sistema. Fuente: Autores.	27
XIII.	Wi-Fi y Comunicación Cloud. Fuente: Autores.	32
XIV.	Datos Arduino Cloud. Fuente: Autores.	32
XV.	Interfaz de Usuario. Fuente: Autores.	34
XVI.	Resultados del estudio estático de la estructura del seguidor solar. Fuente: Autores.	37
XVII.	Cronograma. Fuente: Autores	47

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente proyecto es crear un sistema de seguimiento solar de doble eje para paneles fotovoltaicos, basado en modernas tecnologías: ESP32 Dev Module y la plataforma de la nube de Arduino para el Internet de las cosas. El sistema rastrea automáticamente la posición del sol a lo largo del día, ajustando los ejes horizontal y vertical para maximizar la captación de luz solar del panel. Esta capacidad de seguimiento dinámico contrasta con los sistemas fijos, cuya eficiencia se ve limitada al no poder adaptarse a los cambios en la posición del sol a lo largo del día.

El sistema funciona con cuatro sensores LDR ubicados en cada esquina del panel solar, para medir la intensidad de luz en diferentes ángulos. Al medir la intensidad de la luz, los sensores envían los datos a un algoritmo de control en el ESP32. El microcontrolador procesa los datos y luego envía instrucciones a los motores para ajustar la posición del panel solar.

Se desarrolló una interfaz de usuario en Python para monitorizar en tiempo real los datos del sistema. Esta interfaz muestra datos como el voltaje generado del panel, la eficiencia del sistema de seguimiento en ambos ejes y las lecturas de los sensores.

En la actualidad, el desarrollo de seguidores solares ha experimentado mejoras significativas en términos de precisión, eficiencia y reducción de costos. Se han implementado mecanismos más robustos y ligeros, que optimizan el movimiento del panel y minimizan el consumo energético de los motores. Además, los avances en sensores de luz y controladores electrónicos han permitido un ajuste más preciso a lo largo del día, aumentando la captación de energía solar. En el sector industrial, los seguidores solares de doble eje están siendo ampliamente adoptados en plantas fotovoltaicas a gran escala, donde su capacidad de mejorar la generación de energía los convierte en una opción cada vez más viable. Asimismo, la integración con plataformas IoT ha facilitado el monitoreo remoto y la recopilación de datos en tiempo real, lo que permite un análisis detallado del rendimiento y posibles mejoras en la operación del sistema.

II. PROBLEMA

La falta de implementación del mecanismo de rastreo en sistemas solares fijos plantea una problemática significativa en términos de eficiencia energética. Los sistemas fijos, al no ajustar su orientación a lo largo del día, limitan la recolección y el aprovechamiento de la energía solar. Esta deficiencia se vuelve aún más evidente al compararla con los sistemas de rastreo solar, que ajustan la posición en respuesta al movimiento del sol, el cual es una fuente inagotable de energía limpia, pero su aprovechamiento máximo requiere de una adaptación continua a las condiciones cambiantes del entorno. Sin un mecanismo de rastreo, los sistemas solares fijos tienen una capacidad reducida para capturar la energía solar durante todo el día, resultando en una pérdida significativa de potencial energético [1].

Además, la falta de un sistema de rastreo afecta la viabilidad económica de la implementación de proyectos solares. Los estudios han demostrado que los sistemas de seguimiento, tanto de uno como de dos ejes ayudan a reducir la pérdida de captación de radiación solar del 10 % al 30 % que tienen los sistemas fotovoltaicos fijos. Esto se traduce en una mayor rentabilidad y en un período de recuperación de la inversión más corto. Sin embargo, debido a la ausencia de un mecanismo de rastreo, los sistemas fijos no pueden aprovechar esta ventaja económica, lo que puede llevar a un costo más alto por unidad de energía generada. Esta situación limita el atractivo de los sistemas fijos para los inversores y propietarios de proyectos solares que buscan maximizar su retorno de inversión [2].

La implementación de un mecanismo de rastreo también impacta la sostenibilidad y la mejora continua de las tecnologías solares. La falta y la implementación de estos mecanismos en sistemas fijos no solo limita el potencial de producción de energía renovable, sino que también retrasa el avance hacia un futuro con tecnologías más sostenibles y con mayor rendimiento. A medida que la demanda de soluciones energéticas sostenibles crece, la ausencia de mecanismos de rastreo en sistemas fijos se convierte en un obstáculo para el progreso de la energía solar [3].

La validación del prototipo y su análisis comparativo con sistemas fijos subraya la importancia de implementar mecanismos de rastreo y avanzar hacia una mayor seguridad energética. Sin embargo, enfrentan desafíos como las fluctuaciones en la generación de electricidad debido a los cambios diarios y estacionales en la posición del sol. Esta característica destaca la necesidad de innovación continua e integración inteligente de sistemas para almacenar energía y mejorar su eficacia y confiabilidad de la energía eléctrica producida a partir de la luz solar [4]. La variación de intensidad de la radiación solar en diferentes partes del mundo es también un obstáculo importante a superar. En las áreas próximas al Ecuador, expuestas a los rayos solares más directos es siempre intensa y muy regular a lo largo del año, por lo que los sistemas fotovoltaicos son más efectivos. Sin embargo, en latitudes más altas, los cambios en la inclinación del sol y el ciclo de las estaciones pueden resultar en periodos extensos de baja irradiación, que influyen negativamente en la producción de energía.[5]. La radiación solar provoca una dificultad considerable para la implementación y expansión de la energía solar fotovoltaica. El norte de África y el Medio Oriente, tienen un potencial considerable para la generación de energía solar, mientras que áreas con menor radiación, como partes de Europa del Norte y Canadá, enfrentan limitaciones en su capacidad para aprovechar esta fuente de energía renovable [6].

Actualmente, en Ecuador, la falta de energía eléctrica es consecuencia de los frecuentes apagones, causados principalmente por el descuido en el mantenimiento de las hidroeléctricas, lo que ha afectado a una gran parte de la población del país, tanto a industrias como a pequeños y grandes comercios. Tiendas y restaurantes dependen de esta energía para conservar sus productos en contenedores refrigerados, el cual que los ha obligado a optar por la compra de generadores eléctricos para el uso prolongado en el tiempo en que la energía no está disponible. Esto demuestra que el país no está preparado para el uso de energías limpias, que pueden ayudar a reducir esta escasez de energía.

III. JUSTIFICACIÓN

La Tierra recibe una cantidad colosal de energía solar. Esta radiación solar se presenta como la fuente de energía verde más prometedora, ya que es abundante, limpia, gratuita e inagotable. Para aprovechar al máximo esta fuente de energía, se han desarrollado sistemas solares que se clasifican en dos tipos: fijos y de seguimiento. Los sistemas solares fijos, como su nombre lo indica, permanecen en una posición estática. Si bien son más simples y capaces de soportar condiciones climáticas extremas, su rendimiento se ve restringido por la incapacidad de aprovechar toda la energía solar disponible [7].

Por otro lado, los sistemas solares de seguimiento, ya sea de uno o dos ejes, orientan los paneles solares hacia la posición del sol, maximizando la captación de energía a lo largo del día y las estaciones. Si bien este tipo de sistema implica una mayor complejidad en su instalación y requiere de preparativos adicionales del sitio, su mayor eficiencia energética lo convierte en una opción cada vez más utilizada. Los sistemas de seguimiento solar representan una tecnología altamente eficiente y rentable para aprovechar la energía solar. Su implementación en diversos sectores puede contribuir a un futuro más sostenible y con mayor seguridad energética [4].

La comparación entre los sistemas fotovoltaicos fijos, de un eje y de dos ejes revela diferencias clave en eficiencia, precisión y costos. Los sistemas fijos tienen paneles en una posición fija, lo que resulta en costos de instalación más bajos pero menor eficiencia, ya que no ajustan su orientación durante el día. Gracias a su movimiento este a oeste, estos dispositivos aprovechan al máximo la energía solar disponible, aunque su ajuste en un solo plano limita la eficiencia comparado con los rastreadores de doble eje que ajustan la orientación tanto en azimut como en inclinación, también maximizan la captura de energía solar durante todo el día y en todas las estaciones, pero su complejidad y costo son mayores. La elección entre estos sistemas dependerá de las necesidades específicas y el presupuesto disponible [8].

Para hacer frente a las fluctuaciones en la energía solar y garantizar una producción estable, es necesario diseñar y mantener sistemas fotovoltaicos adaptados a cada región. En zonas con poca luz solar, tecnologías como paneles solares de alta eficiencia y sistemas de seguimiento solar son cruciales para maximizar la captación. Además, el almacenamiento de energía en baterías permite suavizar las variaciones en la producción, asegurando un suministro continuo [5].

La transformación hacia un sistema energético sostenible implica que los países busquen alternativas a los combustibles fósiles y diversifiquen sus fuentes de energía. Una de las más prometedoras es la energía solar, pero su potencial varía según la radiación solar que recibe cada región. Es necesario realizar un análisis detallado de los recursos solares a nivel global para identificar las zonas con mayor y menor potencial, y así diseñar políticas que promuevan la inversión en tecnologías solares en áreas con menor irradiación, asegurando un acceso equitativo a la energía limpia y contribuyendo a los objetivos climáticos internacionales [6].

Debido a los problemas de energía en el Ecuador, la energía solar, gracias a la radiación solar que recibe Ecuador, es una opción muy prometedora. Sin embargo, para lograr una mayor sostenibilidad, es fundamental complementar este recurso con otras energías limpias, se presenta mucha radiación solar lo que beneficia grandes reservas de energía para su uso. Se propone desarrollar un dispositivo de rastreo solar utilizando sensores Resistores Dependientes de Luz (LDR, Por sus siglas en inglés) y un sensor de radiación que es muy importante para la detección de luz de manera mas precisa y un mecanismo accionado electrónicamente para el movimiento de la estructura de manera biaxial, como una solución más efectiva y rentable para monitorear y controlar la presencia de luz en el ambiente.

IV. OBJETIVOS

IV-A. *Objetivo general*

Desarrollar un mecanismo de rastreo solar para paneles fotovoltaicos con un movimiento biaxial, midiendo la radiación en función al azimut e inclinación.

IV-B. *Objetivos específicos*

- Diseñar una estructura, mediante herramientas de diseño CAD que soporte la carga de movimientos y peso de los componentes del rastreador solar.
- Implementar un sistema que mida la radiación solar en función al azimut e inclinación para la orientación del panel fotovoltaico según la posición del sol.
- Llevar a cabo pruebas de campo en condiciones reales, con validaciones y verificaciones para el rendimiento del rastreador solar de doble eje.

IV-C. *Matriz de objetivos*

Tabla I: Matriz de los objetivos planteados

OBJETIVO	PLANTEAMIENTO	META	INDICADOR	ALCANCE
OE1.	Diseñar una estructura, mediante herramientas de diseño CAD que soporte la carga de movimientos y peso de los componentes del rastreador solar.	Implementar una estructura que pueda ejercer movimientos precisos de giro de 180° e inclinación de 90° para aprovechar la mayor absorción de radiación solar.	Ejecutar pruebas de análisis estático para verificar la capacidad de la estructura para soportar cargas sin que desarrolle deformaciones o cometa fallos.	Se contempla el diseño estructural CAD del rastreador solar, con análisis estático para validar su resistencia y capacidad de movimientos de giro 180° e inclinación 90°.
OE2.	Implementar un sistema que mida la radiación solar en función al azimut e inclinación para la orientación del panel fotovoltaico según la posición del sol.	Obtener una mejora del 10% en la eficiencia energética del sistema.	Recopilar datos de radiación solar en intervalos de 30 minutos, ajustando automáticamente el dispositivo para seguir la posición del sol con una precisión de ± 1 grado en azimut y ± 1 grado en inclinación.	Se incluye implementar un sistema de medición de radiación solar con monitoreo cada 30 minutos y seguimiento automático con precisión de ± 1 grado, buscando mejorar 10% la eficiencia.
OE3.	Llevar a cabo pruebas de campo en condiciones reales, con validaciones y verificaciones para el rendimiento del rastreador solar de doble eje.	Cumplir que el rastreador solar funcione de manera correcta en condiciones climáticas reales como vientos fuertes de un rango de 0 km a 30km/h.	Simular la afectación del viento a velocidades de 30 km/h en SolidWorks evaluando que no haya desviaciones mayores a 3 grados en la orientación del dispositivo.	Se abarca pruebas de campo del rastreador, incluyendo simulaciones de viento hasta 30 km/h en SolidWorks y verificación de que las desviaciones no superen 3 grados en la orientación.

V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

V-A. Trayectoria de rayos solares

El rendimiento en la captación de la luz solar resulta ser un elemento fundamental para la eficiente producción dinámica de energía eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos. Un diseño que contemple la trayectoria del sol desde el inicio de las fases del proyecto que empieza con los diseños básicos, permite poner en marcha estrategias que reduzcan el efecto de la radiación solar directa como la carga de calor en interiores. Durante la fase de la instalación, la adecuada orientación e inclinación de los paneles solares son claves para sacar el mejor partido a la radiación solar que pueda incidir sobre la localización. Para ello, es vital poder conocer en detalle la trayectoria solar de la localización ya que de esta manera nos permite obtener el ángulo óptimo de los paneles para obtener la máxima captación de energía solar a lo largo de la jornada o bien a lo largo del año. [9].

V-A1. *Cálculo de ángulos de inclinación y elevación:* El ángulo de inclinación de la tierra sobre su eje es de 23.45° , el cual varía desde + a - durante las estaciones del año. El ángulo de inclinación respecto al Sol es igual al ángulo formado entre el ecuador y la línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del Sol. La fórmula para calcular la declinación solar variará según la hora del día.[9].

V-A2. *Ángulo de Elevación Solar:* El ángulo de elevación es formado por el rayo solar, el cual impacta sobre una superficie con la línea del plano horizontal. Este ángulo cambia según el día y hora, dependiendo de la latitud donde estemos ubicados. El ángulo de elevación es el ángulo de la latitud y la ubicación dependiendo de que hemisferio sea esta localidad su valor cambiará, positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur. [9].

V-A3. *Tiempo estándar del meridiano de Greenwich (LSTM):* Es un sistema horario que se utiliza como referencia para determinar la hora en diferentes partes del mundo. Se basa en el meridiano de Greenwich, una línea imaginaria que atraviesa el Real Observatorio de Greenwich en Londres, Inglaterra.[10].

V-A4. *Factor de corrección de tiempo:* El factor de corrección de tiempo, es un número que permite modificar la hora solar aparente, esto es, la que se muestra en un reloj de sol, y transformarla en hora solar media, esto es, a la que indica un reloj convencional. La razón para ello es que la Tierra no describe su trayectoria en torno al Sol a velocidad constante y a su vez siendo su eje de rotación perpendicular al plano de su órbita. [10].

donde:

- LSTM: Tiempo Estándar del Meridiano de Greenwich
- long: Longitud del lugar
- EoT: Ecuación del Tiempo

V-A5. *Tiempo solar y ángulo horario:* El tiempo solar de la localidad es un sistema de medición del tiempo basado en la posición del Sol en el cielo en un lugar específico. El ángulo horario son los grados que el sol se mueve en cada hora en el transcurso del día. [9].

V-A6. *Azimut y elevación:* El azimut y la elevación son las coordenadas que define la ubicación del sol y a la luna en cielo cuando estos son observados desde una ubicación específica. El azimut es el ángulo conformado por el sol y el norte que es medido en sentido de la rotación de las agujas del reloj. La elevación también conocida como altitud es el ángulo que se mide desde el horizonte hasta el sol. En otras palabras, es la altura del sol en el cielo, esta se mide en grados, desde el horizonte (0°) hasta el cenit (90°), que es el punto más alto en el cielo. [11].

V-B. Radiación solar

La radiación solar es el flujo de energía que emite el sol y la transmite sobre la forma de radiación electromagnética el cual esta incluye luz visible, luz ultravioleta y luz infrarroja. En el interior del Sol se produce esta energía gracias

a reacciones nucleares de fusión, ya que los átomos de hidrógeno se fusionan y producen helio, generando una gran cantidad de energía. Esta energía viaja en el espacio en forma de radiación y transcurre hasta llegar a la Tierra en un tiempo aproximado de 8 minutos y 20 segundos. [11].

La radiación solar es la principal fuente de energía para el planeta y es la responsable de la vida en la tierra, en procesos importantes como la fotosíntesis en las plantas, el ciclo del agua y el clima. La radiación solar se considera una fuente de energía de naturaleza renovable que puede aprovecharse adecuadamente para la transformación en electricidad a través de los paneles solares [11].

El Atlas Solar del Ecuador evalúa la irradiación solar en varias regiones del país, proporcionando datos cruciales para la implementación de proyectos de energía solar. La irradiación solar, que mide la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie específica, se calcula mediante métodos instrumentales y simulaciones. Los resultados del atlas demuestran que Ecuador posee un alto potencial para la generación de energía solar, con niveles de irradiación que varían según la región y la estación del año. Esta información es esencial para el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas y otras aplicaciones solares, promoviendo la sostenibilidad energética en el país. [12].

V-C. Paneles Solares

En la actualidad, la transición hacia energías sostenibles es una prioridad global para reducir el impacto ambiental, en particular debido a los efectos adversos del uso intensivo de combustibles fósiles. La energía solar ha emergido como una alternativa más atractiva dentro de las energías renovables, gracias a su capacidad para ser implementada en una amplia variedad de regiones geográficas [3]. Este tipo de energía no solo ofrece una solución más limpia, sino que también es más segura y económica a largo plazo. Desde la creación del primer sistema solar en 1938 por el físico Alexandre Edmond, la tecnología solar ha avanzado notablemente, permitiendo la producción de electricidad de manera eficiente y con costos reducidos [13]. A nivel mundial, la capacidad instalada de paneles fotovoltaicos ha superado 1 TW, destacándose en países como China, EE.UU., Japón, Alemania e India [14]. Estos paneles, compuestos por celdas de silicio, transforman luz solar en electricidad de manera eficiente. Entre ellos, los paneles monocristalinos se distinguen por su alta eficiencia, aunque los policristalinos son más asequibles debido a su proceso de fabricación menos complejo [15].

Hoy en día han surgido numerosos estudios sobre energías limpias, destacándose la energía por generación fotovoltaica. Según un estudio del Banco Mundial sobre el potencial global de la energía fotovoltaica, Ecuador junto con ciertos países europeos representa aproximadamente el 9 % de la población mundial en países con un potencial fotovoltaico de salida (PVout) inferior a 3.5 kWh/kWp. En contraste, el 20 % de la población mundial reside en países que disfrutan de un PVout superior a 4.5 kWh/kWp, lo que subraya la variabilidad en el rendimiento potencial de la energía solar a nivel mundial. [16].

En la figura 1 podemos comprender que a pesar de sus limitaciones, la energía fotovoltaica sigue siendo una opción viable y valiosa para Ecuador, especialmente en zonas rurales y aisladas que no tienen acceso a la red eléctrica convencional. Además, el desarrollo de tecnologías más eficientes y la disminución de los costos de la energía solar podrían mejorar el panorama en el futuro.[17].

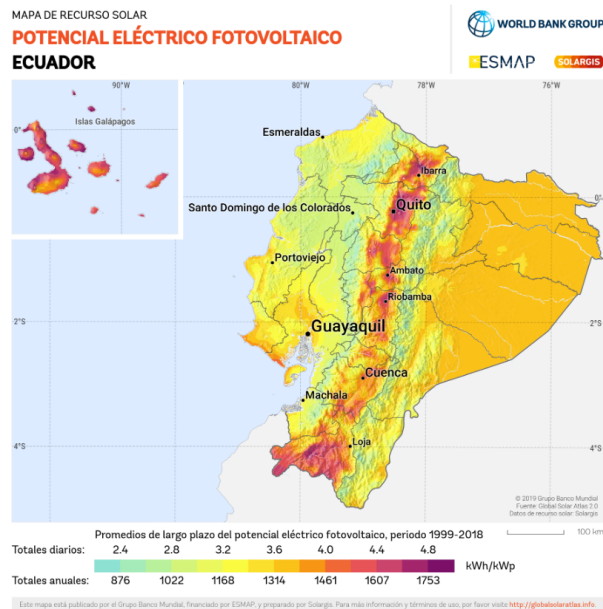


Figura 1: Potencial fotovoltaico en Ecuador [17].

V-D. Conversión de radiación solar en energía eléctrica en paneles fotovoltaicos

Este mecanismo de conversión de energía solar en electricidad se produce mediante un fenómeno físico conocido como el efecto fotovoltaico, el cual se lleva a cabo en las celdas fotovoltaicas, pieza fundamental de los paneles solares. Las celdas fotovoltaicas se preparan utilizando materiales semiconductores, fundamentalmente silicio, por ser un material semiconductor por sus características excepcionales para la conducción de la electricidad[18].

El procedimiento comienza en el momento en que los fotones, estas partículas de luz que constituyen la radiación solar, chocan con la superficie de las celdas fotovoltaicas. Cada fotón transporta una determinada cantidad de energía, que es transferida a los electrones del semiconductor y se produce la ruptura de los enlaces atómicos, lo que provoca la producción de pares de cargas eléctricas: por un lado, unos electrones libres (disponibles y con carga negativa) y por otro, unos huecos (los espacios vacíos con carga positiva). Ambas cargas se separan como consecuencia de la propia estructura interna de la celda, que viene organizada en dos capas de semiconductor, una capa con exceso de electrones (tipo N) y una capa con exceso de huecos (tipo P).

En la unión PN, donde esas dos capas se encuentran, se produce un campo eléctrico que crea una barrera que impide la recombinación entre electrones y huecos. Este campo eléctrico genera una diferencia de potencias, que se conoce como voltaje, el cual obliga a los electrones libres a moverse a través de un circuito externo asociado al panel solar. Este flujo de electrones es lo que se conoce como corriente continua (CC), que podrá ser utilizada directamente o, a partir de un dispositivo llamado inversor, transformarla y transformarla a corriente alterna (AC) que, permitirá alimentar hogares, industrias o sistemas eléctricos. [19].

V-D1. Fórmulas para la conversión de radiación en energía eléctrica:

1. Potencia Eléctrica Generada (P)

$$P = G \cdot A \cdot \eta$$

- P: Potencia eléctrica generada (W)
- G: Irradiancia solar (W/m^2)
- A: Área del panel fotovoltaico (m^2)
- η : Eficiencia del panel fotovoltaico (decimal)

2. Energía Eléctrica Producida (E)

$$E = P \cdot t$$

- E: Energía eléctrica producida (kWh)
- P: Potencia eléctrica generada (kW)
- t: Tiempo (h)

V-E. Paneles Solares monocristalinos y policristalinos

Los paneles solares monocristalinos representan una tecnología avanzada y altamente eficiente para la producción de energía eléctrica, aprovechando un solo cristal de silicio para transformar la luz solar en electricidad. Con una eficiencia que supera el 20 %, estos paneles son especialmente valorados por su capacidad para mantener un rendimiento óptimo incluso en condiciones de temperatura elevadas, lo que contribuye a una vida útil que puede alcanzar hasta 25 años [14]. A diferencia de los monocristalinos, los paneles policristalinos están compuestos por múltiples cristales de silicio, lo que reduce su eficiencia en la generación de electricidad. Sin embargo, su proceso de fabricación es menos costoso y más sencillo, lo que los hace una opción económica, aunque su producción ha disminuido debido a la preferencia por los monocristalinos [20].

La correcta instalación de un sistema fotovoltaico implica una conexión precisa de sus componentes. Inicialmente, los paneles solares se unen mediante cables y conectores especiales, formando un circuito eléctrico. A continuación, estos paneles se conectan al inversor, un dispositivo que transforma la energía solar en electricidad utilizable en el hogar. Finalmente, el inversor se vincula a la red eléctrica, permitiendo el suministro de energía a los dispositivos eléctricos y, en algunos casos, a un sistema de almacenamiento para su uso posterior. Es fundamental respetar las normas de seguridad, incluyendo la conexión a tierra [21].

V-F. Planteamiento y definición de un seguidor solar

Un seguidor solar es un dispositivo que ajusta la orientación del panel solar automáticamente, alineándolo en relación con la orientación del sol en el transcurso del día basándose en su hora de salida hasta su hora de ocultación. Como objetivo principal de los seguidores, es la recolección de luminosidad directa para aumentar la capacidad de transformación de radiación en electricidad. Como objetivo secundario los seguidores solares apoyan la transición hacia fuentes de energías más limpias y sostenibles. Actualmente se implementan dos tipos de seguidores solares: de un eje y de dos ejes [22].

El seguidor solar de un solo eje es mucho más fácil de implementar y más económico, este puede moverse solo en dos direcciones, ya sea norte a sur o de este a oeste. El seguidor de dos ejes desarrolla una mayor movilidad al ejercer los movimientos en los 4 puntos cardinales(norte, sur, este, oeste), además de su rango de inclinación permitiendo lograr un seguimiento más exacto del sol en el transcurso del día. [23].

Los dispositivos de seguimiento solar son sistemas compuestos por tres secciones principales: la sección de soporte, que incluye una estructura rígida y resistente que sostiene el dispositivo y garantiza su estabilidad; la sección de movimiento, donde se integran motores eléctricos y mecanismos de control que permiten el giro e inclinación de los paneles solares para optimizar su orientación según la posición del sol; y la sección de captación de radiación, que utiliza sensores especializados para detectar los puntos de mayor luminosidad y enviar señales al sistema de movimiento, asegurando que los paneles siempre estén alineados con la máxima radiación solar y maximizando así la eficiencia energética del sistema [24].

V-G. Posición geográfica en relación al ecuador.

El sistema de coordenadas geográficas, basado en la latitud y la longitud, permite determinar con precisión la posición de cualquier lugar en la Tierra. La latitud, expresada en grados, indica la distancia angular de un punto respecto al ecuador, variando entre 0° en el ecuador y 90° en los polos. Por su parte, la longitud, medida en grados

a partir del meridiano de Greenwich, señala la posición angular como se observa en la Figura 2, de un punto en dirección este u oeste, con un rango de 0° a 180°. El ecuador, línea imaginaria que circunda la Tierra a la altura de su mayor diámetro, divide al planeta en dos hemisferios: el norte y el sur. Esta línea de referencia, correspondiente a la latitud 0°, es fundamental para determinar la posición geográfica de cualquier lugar [25].

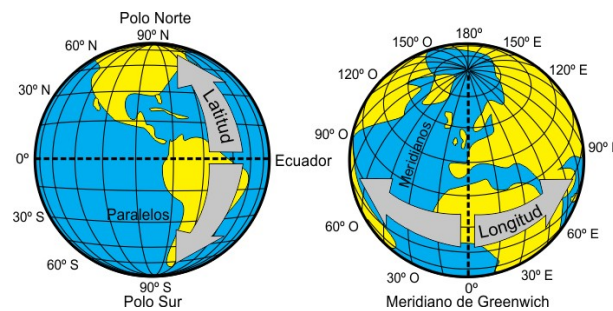


Figura 2: Sistema de coordenadas geográficas [25].

V-H. Mecanismo y composición para un sistema de rastreo solar

Gracias a su doble movimiento, los sistemas de seguimiento solar como se observa en la Figura ??, permiten que los paneles se orienten de manera óptima hacia el sol, maximizando así la producción de energía. Este mecanismo consta de una base sólida que soporta un brazo principal, que a su vez sostiene el panel solar. El brazo principal gira sobre el eje horizontal, mientras que el panel puede ajustarse verticalmente, garantizando que el panel esté alineado con la trayectoria del sol durante todo el día [8].

El ajuste en dos ejes permite una orientación precisa, aumentando la eficiencia del sistema al maximizar el impacto de los rayos solares en el panel. El sistema es controlado por sensores de luz y fotodiodos que detectan la posición del sol. Los datos recogidos por estos sensores son procesados por un controlador central, como un microcontrolador ESP32, que activa motores de paso o servomotores para ajustar la posición del panel [26].

V-H1. Tipos de seguidores: El seguidor solar de un eje está diseñado para mover los paneles fotovoltaicos en una única dirección, de este a oeste, siguiendo el recorrido del sol desde el amanecer hasta el atardecer. Gracias a este movimiento, se optimiza la captación de energía solar durante todo el día, aumentando significativamente la eficiencia del sistema [27].

Los seguidores solares de doble eje permiten ajustar la posición de los paneles en dos direcciones: norte-sur y este-oeste. Gracias a esta capacidad de movimiento, pueden optimizar la captación de energía solar a lo largo del día y durante todas las estaciones del año. Aunque ofrecen un rendimiento superior en comparación con los seguidores de un solo eje, su costo es más elevado debido a la mayor complejidad de su diseño y mecanismo [28].

V-H2. Tipos de mecanismos: El mecanismo de pan y tilt, usado en sistemas solares, también se aplica en otras áreas como cámaras de vigilancia, telescopios astronómicos y antenas de comunicación, proporcionando ajustes precisos y aumentando la funcionalidad [26].

V-I. Arduino iot cloud

La incorporación de una solución de monitoreo de software para sistemas fotovoltaicos es fundamental para el proyecto. Se ha elegido Arduino Cloud como plataforma por su actitud robusta para la adquisición y análisis de datos provenientes de una gran variedad de dispositivos IoT. La plataforma como se observa en la Figura 3, facilita una nube extensible y flexible para la conexión y gestión remota de los sensores y actuadores involucrados en el

proyecto de monitoreo. Arduino Cloud se caracteriza por poseer una interfaz de usuario intuitiva y amigable que mejora la configuración y el desarrollo de aplicaciones IoT. Aunado a esto, la misma presenta un conjunto completo de herramientas y bibliotecas que facilitan tareas como la recolección de datos en tiempo real, el almacenamiento en la nube, la visualización en gráficas y la generación de alertas [29].



Figura 3: Plataforma Arduino Cloud IoT [30].

V-II. Plataformas similares a Arduino IoT Cloud: Existen varias plataformas similares a Arduino IoT Cloud, como Cayenne, ThingSpeak y Thingier.io, que brindan características especiales para el desarrollo de aplicaciones IoT. Estas plataformas permiten la visualización de datos en tiempo real y ofrecen opciones de personalización de interfaces. En particular, ThingSpeak y Thingier.io son ideales para proyectos que necesitan almacenar datos a largo plazo, gracias a su capacidad para retener la información de manera eficiente [31].

V-I2. Que es una plataforma en la nube: Una plataforma en la nube es un conjunto de recursos que incluye tanto herramientas de hardware como de software, infraestructura y servicios, diseñados para permitir que los usuarios gestionen y accedan a sus datos, aplicaciones y servicios a través de Internet. En lugar de almacenar y procesar los datos en dispositivos locales, todo se maneja de manera remota en servidores ubicados en diferentes lugares [32].

V-J. Microcontrolador ESP32

El ESP32 como se observa en la Figura 4, es un microcontrolador de grandes capacidades, suficientemente versátil como para utilizarlo en un proyecto de tipo IoT, integrando de forma nativa conectividad Wi-Fi y Bluetooth. Tal característica le permite posicionarse como una plataforma adecuada para recoger y analizar datos de sensores, como los que permiten medir la intensidad de la luz solar. Por su capacidad para conectarse a internet y a otros dispositivos, el ESP32 permite enviar los datos a la nube para su almacenamiento y procesamiento, lo que permite obtener información de interés [33].

V-J1. Características de la ESP32: Una de las características más importantes es su alto rango de funcionamiento en voltajes que está entre 4.5 y 9 voltios, lo que lo hace muy eficiente en su consumo de energía, cualidad esencial para los proyectos de IoT en los que la autonomía es fundamental. La arquitectura dual core del ESP32 permite la ejecución de múltiples tareas en paralelo como parte del proceso de optimización del funcionamiento del diseño. A la hora de programar el ESP32 está disponible más de una opción de entornos de desarrollo integrados (IDEs), cada una con sus pros y sus contras. Arduino, uno de los IDEs más extendidos y sencillos de usar, tienen por una parte una interfaz sencilla y una comunidad de usuarios amplia, que ayuda mucho a la creación de proyectos [33].

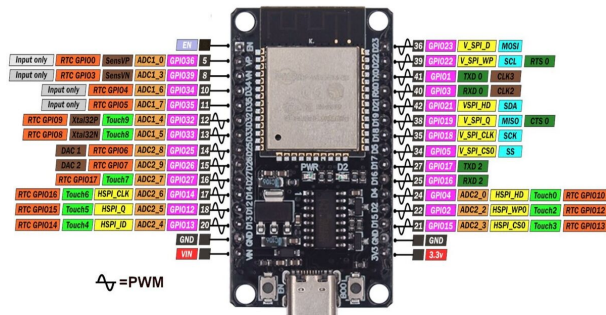


Figura 4: Pines del microcontrolador ESP32 [33].

V-K. Módulo LDR

Los módulos LDR, también denominados fotoresistencias como se observa en la Figura 5, se representan como sensores de luz muy versátiles, baratos y utilizados en un gran número de aplicaciones: desde el control automático de la luz, a la robótica o la agricultura. En este caso el funcionamiento se basa en la resistencia eléctrica que varía con la luz que incide: la luz favorece un descenso de la resistencia de un LDR, lo que permite medir de manera precisa la intensidad luminosa. Estas características unidas a su bajo coste y facilidad de utilización los hacen una opción muy habitual para proyectos donde se requiere la detección de luz solar [34].

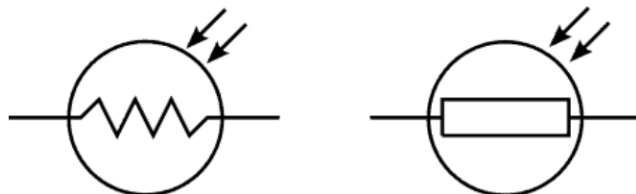


Figura 5: Función y simbología del LDR [35].

V-K1. *Tipos de detección del LDR:* Además de su uso para poder medir la intensidad de la luz solar, los LDR se pueden utilizar para poder detectar otro tipo de radiaciones electromagnéticas como la luz ultravioleta y la luz infrarroja. La sensibilidad a la luz hace que sea un sensor perfecto para poder construir sensores de proximidad, circuitos para controlar la luz o circuitos de seguridad que detecten el movimiento. Hay que tener en cuenta que la respuesta de un LDR depende de la longitud de onda de la luz incidente. Igualmente, la temperatura ambiente también influye en la respuesta de un LDR. Por lo tanto, lo ideal será calibrar los LDR con fines de precisión ante condiciones ambientales específicas [35].

V-K2. *Tipos de sensores:* De acuerdo con el material de fabricación, podemos encontrar los siguientes tipos de fotoresistencias:

1. Sulfuro de cadmio: Los dispositivos fabricados con este material son extremadamente sensibles a las radiaciones luminosas visibles, aquellas que el ojo humano puede percibir [36].
2. Sulfuro de plomo: Estos dispositivos son especialmente sensibles a las radiaciones infrarrojas [36].

V-K3. *Clasificación por Linealidad:* Según su linealidad, los tipos de fotoresistencias más comunes son los siguientes:

1. Fotoresistencia lineal: Estos dispositivos se polarizan de manera inversa. También se les conoce como fotodiodos o fotoresistores debido a su comportamiento lineal y su funcionamiento [36].
2. Fotoresistencia no lineal: Son las más comunes y su comportamiento no depende de la polaridad con la que se conecten [36].

V-L. *Sensor de voltaje*

El sensor de voltaje tiene una importancia primordial en la circuitería de la regulación del rastreador solar, debido a que, dicho componente electrónico o de medida, es el encargado de medir la tensión eléctrica generada por el panel solar. La información que proporciona el sensor de voltaje es decisiva para el almacenamiento y recolección de datos [37].

V-L1. *Especificaciones del sensor de voltaje:* El medidor de voltaje FZ0430 funciona mediante un divisor de tensión compuesto por resistencias de 30K y 7.5K, lo que significa que la señal de voltaje que llega al módulo se reduce por un factor de 5 ($7.5/(30+7.5)$). La máxima tensión que puede medir este módulo es de 25V si el procesador está alimentado a 5V (Vcc) y de 16.5V si el procesador está alimentado a 3.3V (Vcc). Superar estos valores podría dañar el pin analógico del Arduino. La precisión de medición de este módulo es de 24,45mV [38].

V-L2. *Esquema de conexiones:* El esquema de conexión del sistema es bastante sencillo de implementar. En primer lugar, se debe conectar la fuente de tensión que queremos medir a los terminales correspondientes del módulo, asegurándose de respetar la polaridad para evitar errores en la medición. Por otro lado, se debe realizar la conexión entre la electrónica del módulo FZ0430 y el Arduino. Esto se lleva a cabo conectando el pin GND del módulo al GND de Arduino, y el pin SIG del FZ0430 a una de las entradas analógicas disponibles en el Arduino. Este tipo de conexión permitirá que la información de voltaje se transmita correctamente al microcontrolador para su procesamiento y posterior análisis [39].

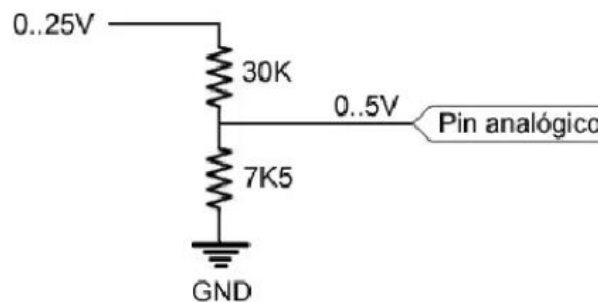


Figura 6: Divisor de voltaje [39].

V-L3. *Aplicaciones del sensor de voltaje:* Este sensor resulta muy práctico para monitorear el estado de una batería, verificar la alimentación de dispositivos que operan a 12 V o 24 V, como tiras de LED, electro imanes, ventiladores o celdas Peltier. Su versatilidad lo convierte en una herramienta ideal para asegurar que estos componentes estén recibiendo el voltaje adecuado para su funcionamiento [40].

V-L4. *Compatibilidad del Sensor FZ0430 con Microcontroladores:* El módulo sensor de voltaje 0 a 25V DC - FZ0430 es compatible con los siguientes microcontroladores y plataformas de desarrollo:

Característica	Valor
Rango de entrada de voltaje	0V a 25V DC
Voltaje detección entrada máximo	25V (5V x 5) o 16,5V (3,3V x 5)
Rango de detección de voltaje	24,41mV – 25V
Resolución analógica de tensión	0,00489V DC
Voltaje detección entrada mínimo	24,45mV (4,89mV x 5)

Tabla II: Características técnicas [38].

1. Microcontroladores PIC
2. Tarjetas de desarrollo Arduino (como Arduino Uno, Mega, Nano, etc.)
3. Raspberry Pi
4. Plataformas basadas en ESP32 y ESP8266
5. STM32

Estas plataformas permiten integrar el sensor para realizar mediciones de voltaje con facilidad, gracias a su conectividad analógica y digital [41].

V-M. Driver L298N

El L298N tiene un papel importante en un seguidor solar de doble eje. Proporcionando conexión a los motores que hacen girar los ejes de un panel solar a las salidas del L298N, se obtendrá movimiento de un modo adecuado. Las señales de control emitidas a los pines de entrada del chip proceden del microcontrolador o de un circuito de control para especificar la velocidad y dirección en la que girarán los motores, lo que habilitará al panel solar para seguir al sol en dos ejes. El control correcto es esencial para conseguir la mejor captación de energía solar y el mejor rendimiento posible del sistema [42].

V-M1. Aplicaciones del Driver L298N: Es una pieza clave en diversos proyectos gracias a su capacidad para controlar motores de manera eficiente. En el campo de la robótica, permite regular la dirección y velocidad de motores DC, lo que lo hace ideal para robots móviles y brazos robóticos. También es ampliamente utilizado en sistemas de automatización, donde facilita el accionamiento de motores en puertas automáticas, sistemas de riego y otros dispositivos mecánicos que requieren movimiento programado. Además, se emplea en modelismo y juguetes, especialmente en vehículos teledirigidos y maquetas a escala, donde es esencial para gestionar el desplazamiento y la dirección de los motores [43].

V-M2. Especificaciones técnicas: El driver L298N incorpora un regulador de voltaje LM7805, que suministra 5V para alimentar su circuito de control. A través de un jumper, se puede activar o desactivar este regulador, permitiendo que la etapa lógica del módulo funcione correctamente sin necesidad de una fuente de alimentación externa adicional [44].

Característica	Valor
Chip	L298N
Canales	2 (soporta 2 motores DC o 1 motor PAP)
Voltaje lógico	5V
Voltaje de potencia (V motor)	5V - 35V DC
Consumo de corriente (lógico)	0 a 36mA
Capacidad de corriente	2A (picos de hasta 3A)
Potencia máxima	25W
Dimensiones	43 * 43 * 27 mm
Peso	30g

Tabla III: Especificaciones del Driver L298N [44].

V-M3. *Esquema eléctrico del Driver L298N*: El circuito principal del L298N como se muestra en la Figura ?? está compuesto por cuatro transistores NPN, cada uno con sus respectivas resistencias de polarización en la base. Además, incluye cuatro diodos conectados en antiparalelo, cuya función es proteger los transistores de posibles sobrecorrientes inversas generadas por los bobinados del motor. También cuenta con dos conmutadores de dos posiciones que permiten alternar entre la alimentación con Vcc y la conexión a tierra [45].

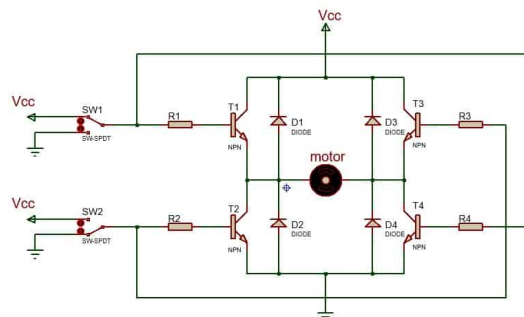


Figura 7: Diagrama del Circuito Interno del Driver L298N [45].

V-M4. *Comparación con otros Drivers:*

- **Driver TB6612FNG:** Se considera una versión mejorada del L298N, ya que también incorpora dos puentes H y la electrónica necesaria para facilitar su uso y prevenir cortocircuitos por errores de conexión. La principal diferencia es que el TB6612FNG utiliza transistores MOSFET en lugar de BJT, lo que le brinda mayor eficiencia y un tamaño más compacto. Además, soporta corrientes más altas, con hasta 1.2A por canal de forma continua y picos de 3.2A, mientras que el L298N, aunque teóricamente admite 2A, en la práctica solo alcanza entre 0.8 y 1A debido a las pérdidas. Otro beneficio del TB6612FNG es que no sufre la caída de tensión del L298N, que puede superar los 3V, ya que en su lugar presenta una resistencia interna de solo 0.5 ohmios [46].
- **Driver BTS7960:** El driver basado en BTS7960 es ideal para el control de motores DC de alta potencia, ya que puede suministrar hasta 43A con un rango de voltaje de 6 a 27V. Su circuito de control es compatible con microprocesadores de 3.3V y 5V, lo que facilita su integración en distintos proyectos. Además, permite regular la velocidad del motor mediante PWM con una frecuencia máxima de 25 kHz. Este módulo incluye protecciones contra cortocircuitos, sobrevoltaje, tensión y sobrecalentamiento, garantizando un funcionamiento seguro [47].

V-N. *Motor DC 12V - JGY-370*

Los motores JGY-370 son una excelente opción para aplicaciones que necesitan un ajuste preciso de la velocidad y la capacidad de invertir el giro. En el caso de los seguidores solares, estas características son fundamentales, ya que permiten controlar con gran exactitud los movimientos de rotación e inclinación. Estos motores están fabricados con materiales de alta calidad, ofrecen un buen rendimiento en términos de par, funcionan de manera silenciosa y tienen una vida útil prolongada. Gracias a estas ventajas, los seguidores solares pueden realizar sus movimientos de manera eficiente, incluso en condiciones climáticas adversas, como lluvias intensas o temperaturas extremadamente altas [48].

V-N1. *Lugares de aplicaciones del Motor DC 12V - JGY-370:* Automatización industrial: Se emplea en la maquinaria industrial para gestionar el desplazamiento de diversos componentes. Robótica: Se utiliza en robots para regular sus movimientos y operaciones. Automoción: Se integra en sistemas de vehículos para controlar elementos como ventanas eléctricas, limpiaparabrisas y asientos ajustables. Juguetes y modelos a escala: Se usa en

juguetes y modelos a escala para accionar las diferentes partes móviles. Equipos médicos: Se aplica en dispositivos médicos para ajustar el movimiento de sus componentes. Sistemas de seguridad: Es útil en sistemas de seguridad para gestionar el movimiento de cámaras de vigilancia, puertas automáticas, entre otros [49].

V-N2. *Limitaciones de uso del motor JGY-370:* El correcto uso y mantenimiento del motor es fundamental para garantizar su eficiencia y prolongar su vida útil. Es importante asegurarse de que el lubricante fluya adecuadamente a través del cojinete del eje giratorio, ya que cualquier obstrucción puede afectar su funcionamiento. La rotación del eje, si no se maneja correctamente, puede reducir la durabilidad del motor, por lo que es esencial verificar que la carga esté dentro de los parámetros recomendados. No se debe sobrecargar el motor ni colgar elementos pesados del extremo del eje, ya que esto puede dificultar la rotación y generar daños. Además, almacenar el motor en ambientes con altas temperaturas, humedad extrema o gases corrosivos puede afectar negativamente su rendimiento. Así mismo, se debe evitar que el eje se atasque, ya que esto podría provocar un sobrecalentamiento y una falla en poco tiempo. En el proceso de soldadura de los terminales, la temperatura del soldador no debe exceder los $340^{\circ}\text{C} \pm 40^{\circ}\text{C}$ y el tiempo de calentamiento debe ser inferior a tres segundos para evitar deformaciones plásticas que puedan afectar la conexión. En general, el cumplimiento de estas recomendaciones garantizará un funcionamiento óptimo y una mayor confiabilidad del motor [48].

Voltaje nominal: 12V								
Relación de reducción	37	65	150	200	250	324	600	972
Corriente sin carga (mA)	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Velocidad sin carga (rpm)	160	100	40	30	25	18	10	6
Torque nominal (kg.cm)	0.8	1.5	3.4	4.5	5.6	7.3	13.0	22.0
Velocidad nominal (rpm)	120	75	30	23	18	13	7	4.5
Corriente nominal (A)	≤ 0.38	≤ 0.38	≤ 0.38	≤ 0.38	≤ 0.38	≤ 0.38	≤ 0.38	≤ 0.38
Torque de bloqueo (kg.cm)	2.9	4.8	11.0	15.0	18.0	23.0	25.0	25.0
Corriente de bloqueo (A)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

Tabla IV: Especificaciones del motorreductor [48].

V-Ñ. Fuente conmutada de 12v a 12.5A

La fuente de alimentación conmutada de 12V a 12.5A, con potencia nominal de 150W, desempeña un papel fundamental en la realización de este prototipo de seguimiento solar, pues genera la corriente continua que requiere la corriente alterna de la red eléctrica. Su topología conmutada está diseñada para trabajar con una alta eficiencia energética, generando así la baja pérdida debida a la disipación de la energía por calor [50].

Característica	Valor
Voltaje de entrada	110V AC a 240V AC
Frecuencia	50/60 Hz
Voltaje de salida	12V DC
Corriente de salida	12.5A
Potencia máxima de salida	150W
Terminales de entrada	L (Línea), N (Neutro), Símbolo de tierra
Terminales de salida	2 terminales positivas (+), 2 terminales negativas (-)

Tabla V: Especificaciones de fuente conmutada [51].

V-Ñ1. *Funcionamiento de las etapas de una fuente conmutada:* El filtro de compatibilidad electromagnética (EMC) absorbe perturbaciones eléctricas como ruidos, armónicos y transitorios, además de evitar que la fuente genere interferencias en la red. El puente rectificador convierte la corriente alterna en pulsante, permitiendo el paso en un solo sentido. Para optimizar el consumo, el corrector del factor de potencia corrige el desfase entre la corriente y la tensión, evitando pérdidas de energía. El condensador estabiliza la corriente pulsante, convirtiéndola en continua, mientras que el transistor regula su flujo al actuar como un interruptor controlado. El controlador

activa y desactiva el transistor, protege contra cortocircuitos y regula la tensión de salida. El transformador reduce la tensión y aísla eléctricamente la entrada de la salida. El diodo convierte la corriente alterna del transformador en pulsante, que luego el filtro suaviza para generar corriente continua. Finalmente, el opto acoplador mantiene aislados el circuito de control y la salida, evitando interferencias [37].

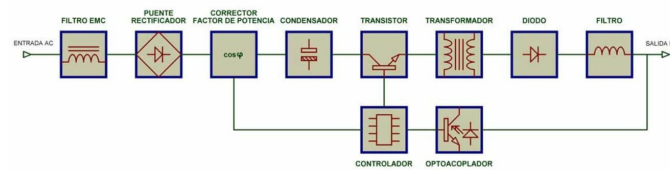


Figura 8: Etapas de fuente conmutada[37].

V-Ñ2. Aplicación de la fuente: El uso de este sistema es muy versátil y se adapta a una amplia variedad de aplicaciones en iluminación LED. Es ideal para proyectos de decoración en interiores, iluminación de jardines, exhibiciones comerciales, anuncios luminosos y letreros LED. Además, su funcionalidad lo hace útil en el desarrollo de proyectos electrónicos, permitiendo integrar iluminación en circuitos y sistemas personalizados para diversas aplicaciones tecnológicas [51].

V-O. Controlador solar

El controlador solar puede ser considerado como la central del sistema fotovoltaico ya que va a tener la función de controlar cómo se traslada la electricidad entre el panel solar y la batería, estando conectado directamente a los terminales de salida del panel solar para que monitoree en tiempo real la tensión y la corriente generadas por este. Entonces, utilizando algoritmos de control, el controlador solar va a realizar la carga de la batería evitando la sobrecarga y la descarga profunda, lo que podría dañar la batería. Fundamentalmente, muchos de los modelos de controlador solar incluyen la función de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), lo que optimiza la extracción de energía del panel solar, maximizando la eficiencia del mismo [52].

V-O1. Controladores de carga PWM: Los controladores de carga PWM son una opción popular debido a su bajo costo y amplia disponibilidad. Su funcionamiento se basa en regular la corriente que proviene de los paneles solares antes de enviarla a las baterías, asegurando que el voltaje se mantenga estable. Este tipo de controlador ajusta el ancho del pulso de la corriente suministrada, lo que permite evitar tanto la sobrecarga como la descarga excesiva de las baterías. A medida que las baterías alcanzan su capacidad máxima, el controlador reduce progresivamente la corriente para mantenerlas en un estado óptimo y prolongar su vida útil. Debido a su eficiencia en sistemas de menor escala y su precio accesible, los controladores PWM son una excelente opción para proyectos con recursos limitados [53].

V-O2. Controladores de carga MPPT: El regulador solar MPPT tiene la capacidad de ajustar de manera independiente la tensión de los paneles solares respecto a la de la batería. Esto permite que el sistema funcione en el punto óptimo de generación de energía, logrando así la máxima eficiencia en la captación y conversión de la energía solar. Los paneles solares de 12V están formados por 36 células en serie, y su punto de máxima potencia (V_{mp}) se encuentra alrededor de 18V. Los paneles de 24V, compuestos por 72 células en serie, su V_{mp} es aproximadamente 37V. Mientras tanto, los paneles con 60 células tienen un punto de máxima potencia cercano a 30V. En los controladores PWM, la tensión de trabajo del sistema está determinada por la batería. Si conectamos un panel solar de 12V a una batería de 12V, el voltaje del sistema variará según el estado de carga de la batería, moviéndose entre 12V cuando está descargada y 14.4V durante la fase de carga. Esto significa que el panel solar no siempre trabajará en su punto óptimo de 18V, lo que reduce su rendimiento y aprovechamiento energético [54].

V-O3. *Aplicaciones del controlador MPPT y PWM en sistemas solares:* La elección entre un regulador de carga PWM o MPPT depende tanto del tipo de paneles solares que tengamos o queramos instalar, como del banco de baterías que estemos utilizando. Generalmente, los reguladores PWM son más económicos que los MPPT. Sin embargo, los reguladores MPPT tienen la capacidad de aprovechar al máximo los paneles solares que operan a una tensión mucho más alta que la de la batería, lo que se traduce en una mayor producción de energía en comparación con los PWM. En casos donde la diferencia de tensión entre el panel y la batería es pequeña (por ejemplo, un panel de 12V con 30 celdas conectado a una batería de 12V), el rendimiento de un regulador PWM es bastante similar al de un MPPT, por lo que en estas situaciones se puede optar por el regulador PWM sin perder eficiencia [55].

Paneles y Baterías	Tipo de controlador
Paneles de 36 celdas y baterías de 12V	MPPT
Paneles de 48 celdas y baterías de 12/24V	MPPT
Paneles de 54 celdas y baterías de 12/24V	MPPT
Paneles de 72 celdas y baterías de 12/24V	MPPT
Paneles de 144 celdas y baterías de 48V	MPPT
Paneles de 30 celdas y baterías de 12V	PWM
Paneles de 60 celdas y baterías de 24V	PWM
Paneles de 120 celdas y baterías de 48V	PWM

Tabla VI: Selección de tipo de controlador según paneles y baterías [55]

V-P. *Batería*

Actúa como un acumulador de energía, es un elemento clave en el sistema de seguimiento solar, cuya utilidad radica a su vez en estar conectada al controlador solar con la particularidad de recoger toda la energía que generan los paneles solares durante las horas de la luz solar y esta energía puede ser útil a la hora de retroalimentar el sistema de seguimiento solar [56].

Las baterías de moto son un componente clave para el funcionamiento de una motocicleta, ya que almacenan energía en forma química y la convierten en electricidad cuando es necesario. La mayoría de estos dispositivos son de plomo-ácido, lo que significa que contienen placas de plomo sumergidas en una solución de ácido sulfúrico. Su principal tarea es suministrar la energía necesaria para encender el motor y alimentar los distintos sistemas eléctricos del vehículo, como las luces, los indicadores y otros accesorios. El rendimiento de la batería es crucial, especialmente en climas extremos, ya que una batería en mal estado puede dificultar el arranque y afectar el desempeño general de la moto. Existen diferentes tipos de baterías, algunas requieren mantenimiento regular, mientras que otras vienen selladas y no necesitan cuidados adicionales. Su diseño y tecnología han evolucionado con el tiempo para ofrecer mayor eficiencia y durabilidad [57].

V-P1. *Tipos de baterías y sus características:* Las baterías han evolucionado con el tiempo para adaptarse a diferentes necesidades, desde automóviles hasta dispositivos electrónicos. A continuación, te explico algunos de los tipos más comunes y sus características principales:

V-P2. *Baterías de Plomo-Ácido (Pb-ácido):* Son las más utilizadas en automóviles y otros vehículos debido a su fiabilidad y costo accesible. Funcionan mediante reacciones químicas entre el plomo y el ácido sulfúrico, generando electricidad. Aunque son pesadas, ofrecen la potencia necesaria para arrancar motores y alimentar sistemas eléctricos como luces y accesorios [24].

V-P3. *Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd):* Fueron populares en el pasado, sobre todo en dispositivos portátiles. Utilizan un cátodo de óxido de níquel y un ánodo de cadmio, separados por un electrolito de hidróxido de potasio. Destacan por su resistencia a descargas profundas, aunque han sido desplazadas por otras tecnologías más eficientes

y menos contaminantes [24].

V-P4. Baterías de Hidruro Metálico de Níquel (Ni-MH): Surgieron a inicios de los 2000 como una mejora de las Ni-Cd, con una mayor capacidad de almacenamiento de energía y sin el impacto ambiental del cadmio. Se utilizan en dispositivos electrónicos y algunas aplicaciones automotrices [24].

V-P5. Baterías de Iones de Litio (Li-Ion): Son ligeras y poseen una alta densidad de energía, lo que las hace ideales para dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos. Utilizan electrolitos líquidos y compuestos de litio, ofreciendo mayor eficiencia y una vida útil más prolongada en comparación con tecnologías anteriores [24].

V-P6. Baterías de Polímero de Litio (Li-Po): Son una variante de las Li-Ion, pero con un electrolito de polímero que les permite adoptar diseños más delgados y flexibles. Gracias a su ligereza y tamaño compacto, se utilizan en dispositivos que requieren baterías pequeñas y de alto rendimiento, como drones y equipos portátiles avanzados [24].

V-P7. El ciclo de vida de una batería y su proceso de carga: El ciclo de vida de una batería abarca todas las etapas que atraviesa desde su fabricación hasta su reciclaje o eliminación. Este proceso incluye su producción, el tiempo en que se utiliza, los ciclos de carga y descarga, y finalmente su disposición responsable. Comprender cada una de estas fases es clave para evaluar su rendimiento y sostenibilidad. Cuando una batería se carga, almacena energía a través de reacciones químicas que ocurren en su interior. En el caso de las baterías de iones de litio, esto significa que los iones se desplazan desde el cátodo (electrodo positivo) hacia el ánodo (electrodo negativo). Durante la descarga, el proceso se invierte y la batería libera la energía almacenada para alimentar dispositivos o vehículos. La duración de una batería se mide en ciclos de carga y descarga. En el caso de las baterías de iones de litio, pueden soportar entre 500 y 2,500 ciclos, aunque su vida útil depende de factores como la temperatura, la profundidad de descarga y el modo en que se carga. Para prolongar su eficiencia, es recomendable utilizar cargadores adecuados y evitar exponerlas a temperaturas extremas. Un buen mantenimiento puede hacer la diferencia entre una batería que dura pocos años y una que sigue funcionando de manera óptima por mucho más tiempo [58].

VI. MARCO METODOLÓGICO

VI-A. *Arquitectura General del Sistema de Seguimiento Solar*

VI-A1. Descripción General del Sistema: Se desarrolla el sistema de seguimiento solar de doble eje como una solución integrada que combina hardware y software para optimizar la captura de energía solar por paneles fotovoltaicos. Este sistema rastrea la posición del sol durante el día y ajusta automáticamente la orientación del panel solar en dos ejes: horizontal (oeste a este) y vertical (norte a sur).

El sistema se basa en un microcontrolador ESP32 debido a sus capacidades de procesamiento, incluida la conectividad inalámbrica incorporada y la etiqueta de precio más accesible, y la versatilidad en la gestión de las E/S. La arquitectura del sistema consta de cuatro elementos principales: un sistema de sensores; actuación y control; supervisión y comunicación.

El sistema de sensores incluye cuatro sensores fotorresistentes (LDR) dispuestos en cuatro direcciones estratégicas. Suministran la información necesaria para calcular la mejor disposición del panel con respecto a la radiación solar entrante. El sistema de actuación incluye dos motores DC controlados por PWM. Los motores eléctricos permiten el movimiento en el eje horizontal 180 y vertical 90 grados.

El sistema de control actúa en el ESP32, procesando las señales LDR y ejecutando los algoritmos paso a paso para calcular los movimientos necesarios de los motores. Opera en el marco de un sistema de estados que administra las condiciones y guarda la energía. Módulos se comunican entre sí según sus protocolos. La arquitectura asegura el mantenimiento de la operación del sistema mediante un diseño modular y un bajo consumo de energía. Por último, algunos sistemas de protección y seguridad se implementan, incluido el limitador de movimiento contra fuertes vientos, la detección del consumo energético, un sistema de retorno a la posición inicial y un control manual de movimiento.

VI-A2. Flujo Operativo del Sistema de Seguimiento Solar: El diagrama de la figura 9 ilustra cómo funciona el sistema de seguimiento solar, desde la inicialización del dispositivo hasta las decisiones de conexión con la nube. La descripción general comienza con la inicialización del ESP32 y la configuración de los pines GPIO para controlar los motores y leer la salida de LDR. Los pines que se utilizan para conectar los LDR se configuran para ser pines analógicos, mientras que los pines de control asignados para los motores se inician típicamente mediante modulación por ancho de pulso.

Más adelante, el dispositivo se conecta a la red Wi-Fi a través de una biblioteca, como WiFi.h, que permite al dispositivo configurar la red y asegurarse de estar conectado. Después de haber completado esta etapa, el ESP32 se conecta a la nube de Arduino por medio del protocolo MQTT o HTTP, que se utiliza para enviar y recibir datos. En este punto, el sistema comienza a tomar medidas de LDR con sensores. La comparación entre los valores y los umbrales preconfigurados ordena la dirección del rastreador solar.

Cuando los sensores LDR detectan una mayor intensidad de luz en el lado izquierdo del panel solar, el sistema envía una señal al motor para ajustar su orientación. Los datos enviados a la nube de Arduino se guardan en un sitio web de monitoreo, donde el usuario puede verificar el estado del sistema y realizar ajustes manuales si es necesario. Además, si el sistema pierde la conexión Wi-Fi, entra en una fase de reconexión, cuyo progreso también se puede supervisar en la plataforma de monitoreo. De esta manera, se garantiza la trazabilidad de cada acción realizada por el sistema.

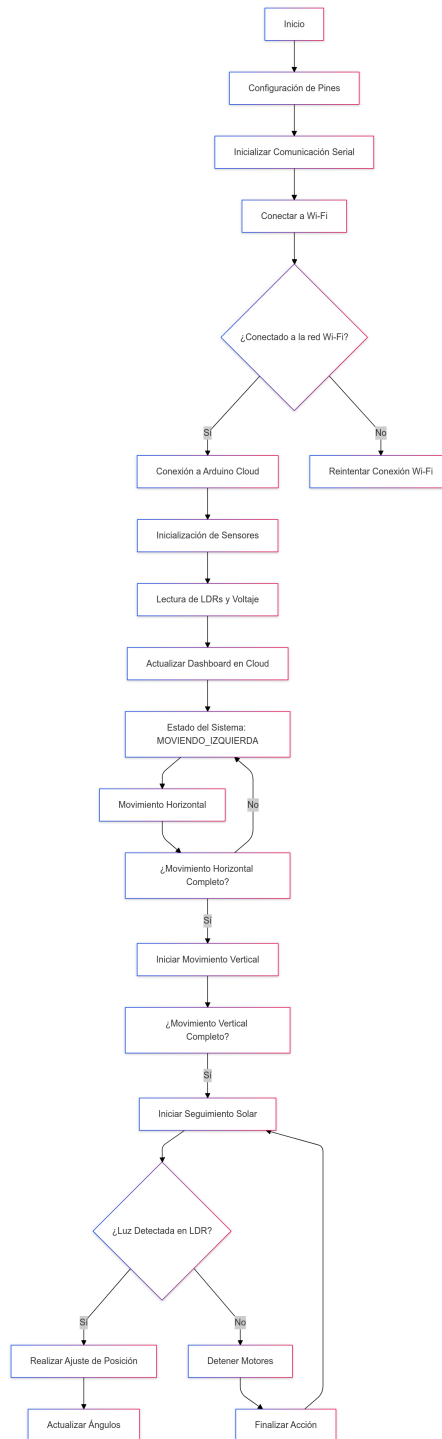


Figura 9: Diagrama de Flujo del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-A3. *Secuencia Temporal de Operaciones del Sistema:* La figura 10 muestra una representación temporal de las actividades del sistema, facilitando el análisis de su funcionamiento a lo largo del tiempo. Durante la fase de inicialización, el ESP32 configura los pines GPIO, establece la conexión a la red Wi-Fi y se conecta a la nube. En la fase operativa, el ESP32 ejecuta un ciclo continuo en el que lee los valores de los sensores LDR en intervalos específicos, por ejemplo, cada 100 ms. Luego, envía comandos para mover los motores, ya sea en

dirección horizontal o vertical, dentro de un intervalo de tiempo determinado. Los motores se desplazan según las órdenes recibidas, y simultáneamente los sensores LDR registran las variaciones de luz. Estos datos se almacenan y se envían a la nube. El sistema repite este proceso de forma cíclica. La interfaz gráfica de usuario (GUI) muestra en tiempo real la posición de los motores y la información de los sensores de luz, gracias a la actualización constante del panel de control en la nube.

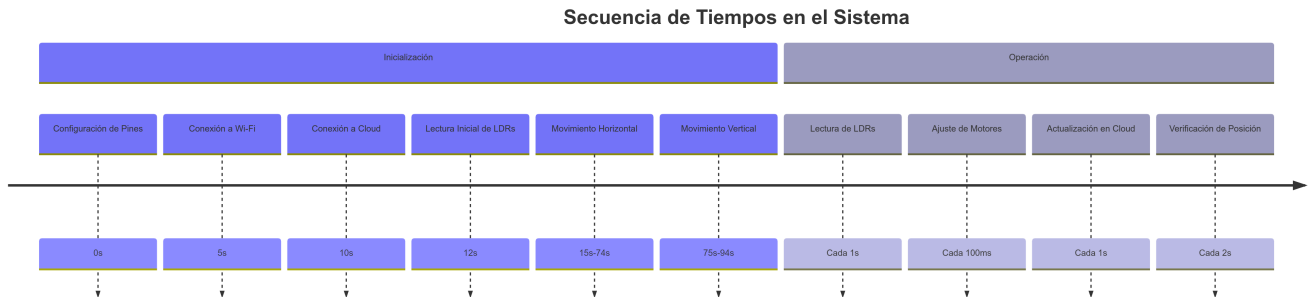


Figura 10: Diagrama de Línea de Tiempo del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-B. Diseño de estructura del seguidor solar

En la Figura 11 se muestra el diseño de cada pieza que conforma el seguidor solar. Este diseño se elaboró con el programa Solidworks. Todas las piezas se realizaron con el fin de obtener un sistema más eficiente, con la finalidad de obtener la mayor detección de luz.

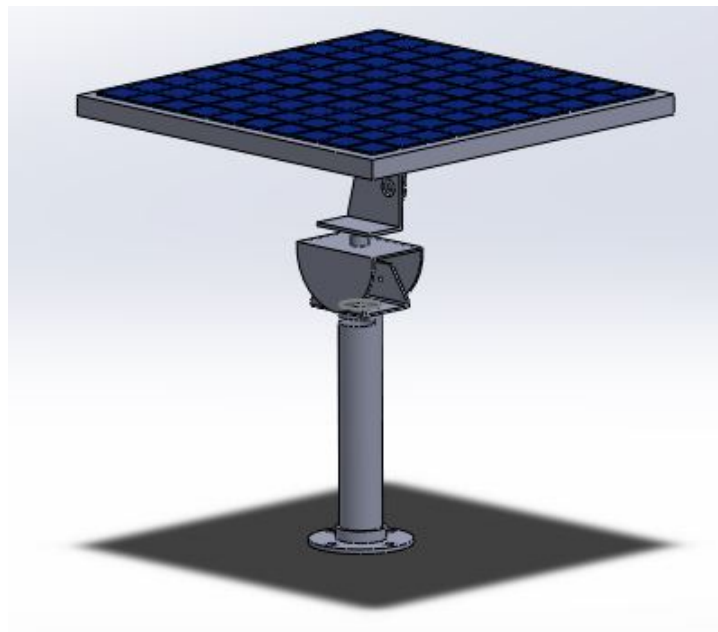


Figura 11: Diseño del seguidor solar. Fuente: Autores.

VI-C. Análisis estructural del seguidor solar

Con el propósito de obtener un concepto claro de la eficacia del diseño de la estructura de rastreo solar, se expondrá una metodología que consiste en la elaboración de un modelo tridimensional muy detallado junto a un programa de elementos finitos, la definición de cargas al igual que las condiciones de apoyo, como se observa en la Figura 12, se realiza el análisis estructural para la obtención de tensiones, deformaciones y desplazamientos.

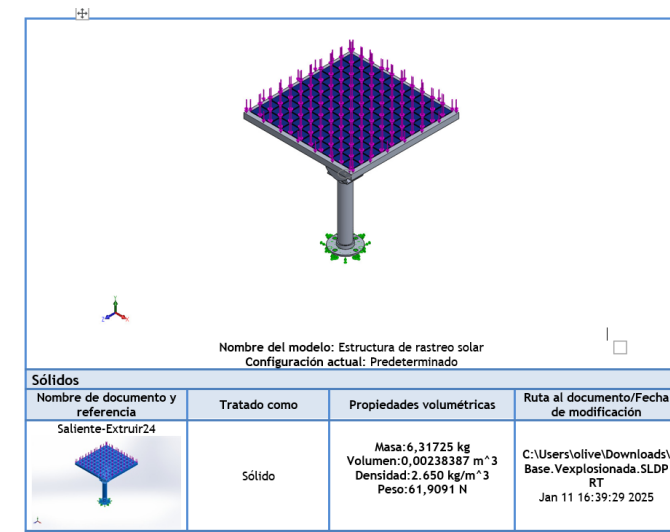


Figura 12: Información del modelo. Fuente: Autores.

En la Figura 13 se realizó el mallado detallado de los componentes que conforma la estructura de rastreo solar. El siguiente mallado nos permitirá apreciar la distribución de las partes que conforman la estructura y de su ensamble para comprender como se distribuye la carga ejercida por el panel solar, ya que sus movimientos compone una fuerza en diferentes ángulos de acuerdo a sus movimientos y giros.

VI-D. Aplicación de la fuerza sobre la estructura

Para profundizar en el análisis estructural y evaluar el comportamiento de la estructura bajo las cargas impuestas por el panel solar, es fundamental cuantificar la fuerza resultante que este ejerce sobre ella. Esta fuerza, denominada carga, es el resultado de la combinación de varias componentes.

En primer lugar, debemos considerar el peso propio del panel solar. Este peso, expresado en Newtons, es una fuerza vertical que actúa directamente sobre la estructura del soporte. Para calcularlo, multiplicamos la masa del panel (en kilogramos) por la aceleración debida a la gravedad (aproximadamente 9.81 m/s²).

Para llegar a una correcta valoración de las cargas es necesario realizar un análisis exhaustivo de las condiciones de carga que experimentará el sistema. No sólo hay que considerar las cargas estáticas (peso propio, cargas permanentes), sino también las cargas dinámicas (viento), que serán variables en el tiempo y con respecto a la ubicación geográfica.

$$\begin{aligned}
 &\text{Convertir kg a Newtons} \\
 &N = m \times g \\
 &\quad \uparrow \quad \uparrow \\
 &\quad \text{Newtons} \quad \text{kg} \\
 &(2,3 \text{ kg}) \times \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 22,563 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \\
 &= 22,563 \text{ N}
 \end{aligned}$$

■ Sujeciones

En este modelo de SolidWorks, las sujeciones fijas simbolizan los puntos en los cuales la estructura de rastreo solar está apoyada como se observa en la figura 14, y son un aspecto fundamental para la obtención de una

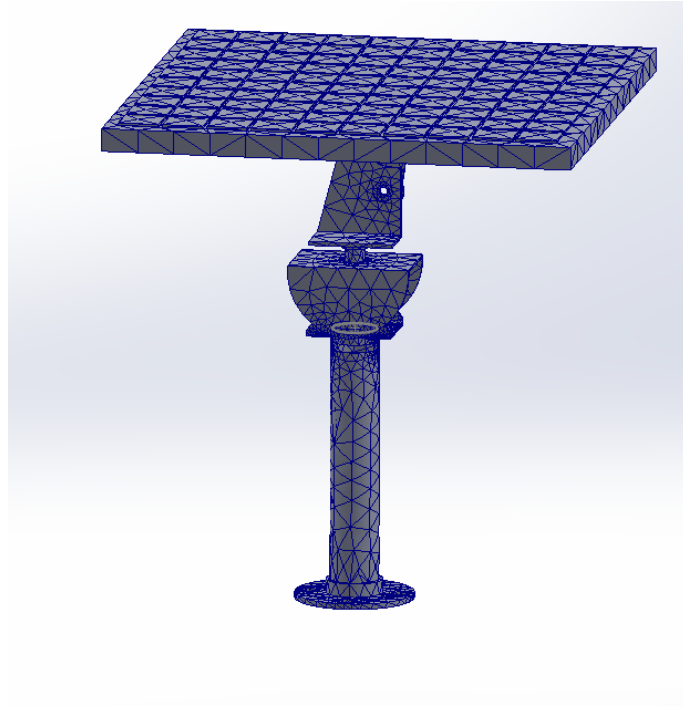


Figura 13: Mallado de la estructura. Fuente: Autores.

simulación lo más ajustada posible a la del comportamiento real de la estructura con las cargas que esta tendrá que soportar en la vida real. En una estructura de rastreo solar, dichas sujeciones fijas suelen situarse en aquellos lugares donde la estructura se ancla en una base al suelo o a una plataforma, y en otros lugares relevantes para estabilizar la estructura.

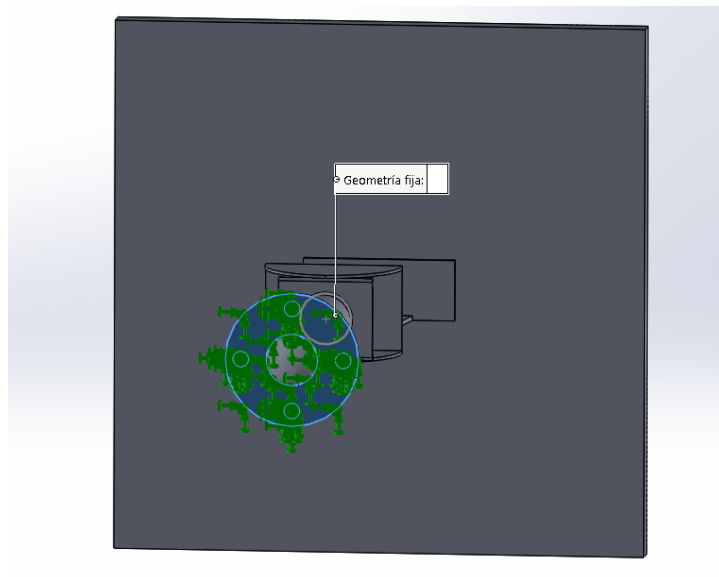


Figura 14: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema. Fuente: Autores.

- Bisagra fija

Esta bisagra como se observa en la Figura 15 restringe el movimiento relativo de las dos partes unidas, permitiendo únicamente la rotación alrededor de un eje específico. Al seleccionar una bisagra fija en este punto, se está modelando

de manera realista la condición de apoyo de la estructura, lo que permite evaluar su comportamiento bajo cargas estáticas, como el peso de los paneles solares.

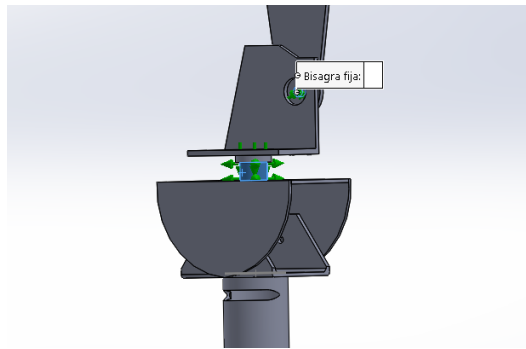


Figura 15: Selección de puntos de movimiento de la estructura. Fuente: Autores.

■ Carga aplicada

Esta carga, se visualiza en la Figura 16 como un conjunto de vectores de fuerza dirigidos hacia abajo en el modelo, representa el peso propio del panel, que aplicando la formula anterior podemos transformar en fuerza ejercida en Newton. La distribución de esta carga a lo largo de la superficie del panel ha sido modelada para evaluar con precisión su impacto en los componentes estructurales.

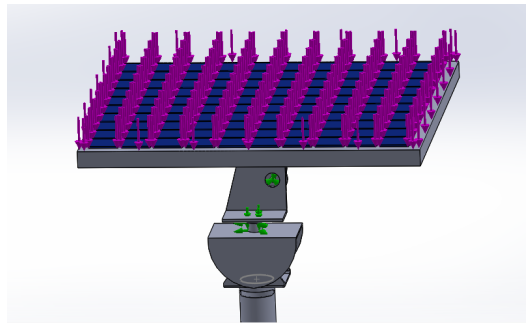


Figura 16: Aplicación de carga ejercida sobre la estructura. Fuente: Autores.

VI-E. *Diseño e Implementación del Hardware*

VI-E1. *Sistema de Motorización:* La tabla VII se presenta las características técnicas de los motores utilizados en el sistema. Tales características son imprescindibles para el proceso de control de movimiento. Se puede ver que los motores DC que se seleccionaron para ese propósito, estos pueden operar entre rangos de voltaje de 12V o 24V con una corriente de $I = 1.3A$. Además, los motores seleccionados generan un torque $M = 0.5Nm$, lo cual es suficiente para mover el seguidor solar y mantenerlo en una posición estable. Por último, la velocidad nominal es $N = 100 \text{ RPM}$ a la tensión de 12V, lo que permite el control de posición con la ayuda de señales PWM.

Parámetro	Detalle
Tipo	Motor DC
Tensión	12V o 24V
Corriente	1.3A
Torque	0.5 Nm
Velocidad	100 RPM (12V)
Control	PWM

Tabla VII: Especificaciones de Motores.

VI-E2. *Sistema de Sensores:* A continuación en la tabla VIII se muestran las conexiones para los sensores LDR utilizados respectivamente para monitorear la intensidad de la luz en cualquier dirección. Cada sensor está conectado a uno de los pines analógicos de la tarjeta ESP32, y esta variación de voltaje se genera debido a la luz que recae sobre este; es utilizado por el sistema para ajustar la dirección de los motores con el fin de maximizar la energía solar captada.

Sensor	Pin ESP32	Descripción
LDR1	GPIO 34	Luz izquierda
LDR2	GPIO 35	Luz derecha
LDR3	GPIO 32	Luz arriba
LDR4	GPIO 33	Luz abajo

Tabla VIII: Sensores LDR. Fuente: Autores.

VI-E3. *Componentes Electrónicos y su Interconexión:* La figura 17 muestra la arquitectura física del sistema interno, destacando los componentes conectados directamente entre sí. El ESP32, es un microcontrolador integrado con un módulo de conectividad Wi-Fi, se conecta a los LDR a través de sus pines analógicos, asignando uno diferente a cada sensor para medir la luz en diversas direcciones de la plataforma. Además, este dispositivo controla los motores mediante pines digitales, gestionando su movimiento horizontal y vertical con PWM. La plataforma ajusta su posición hacia el área donde los LDR informan un valor específico al microcontrolador. También se conecta al router para vincular el sistema a Arduino Cloud, procesando y actualizando los datos sobre el estado de los LDR y los motores en el dashboard.

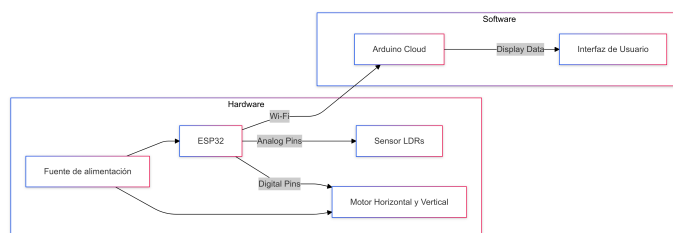


Figura 17: Diagrama de Arquitectura de Componentes Electrónicos del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-E4. *Integración del Microcontrolador ESP32:* En la tabla IX se muestran las conexiones entre los pines del ESP32 y los diferentes componentes del sistema. Los pines GPIO seleccionados controlan directamente los motores y reciben las señales analógicas de los sensores LDR. De esta forma, los pines del microcontrolador, los sensores y los actuadores se interconectan para asegurar el correcto funcionamiento de la lógica de control, empleando señales digitales y PWM para los motores, así como lecturas analógicas a través de la salida DAC para los sensores.

Pin ESP32	Conexión	Descripción
GPIO 23	Motor Horizontal (IN1)	Dirección motor
GPIO 22	Motor Horizontal (IN2)	Dirección motor
GPIO 21	Motor Vertical (IN3)	Dirección motor
GPIO 19	Motor Vertical (IN4)	Dirección motor
GPIO 34	LDR1	Sensor de luz izquierda
GPIO 35	LDR2	Sensor de luz derecha
GPIO 32	LDR3	Sensor de luz arriba
GPIO 33	LDR4	Sensor de luz abajo

Tabla IX: Conexiones del ESP32. Fuente: Autores.

En la figura 18 se muestran las conexiones de los distintos elementos, como el driver L298N, encargado del control del motor horizontal y vertical del seguidor solar. También se aprecian los pines utilizados por los módulos

LDR, ubicados en los extremos del panel solar, y el sensor de voltaje, que permite medir la tensión que entrega el panel solar.

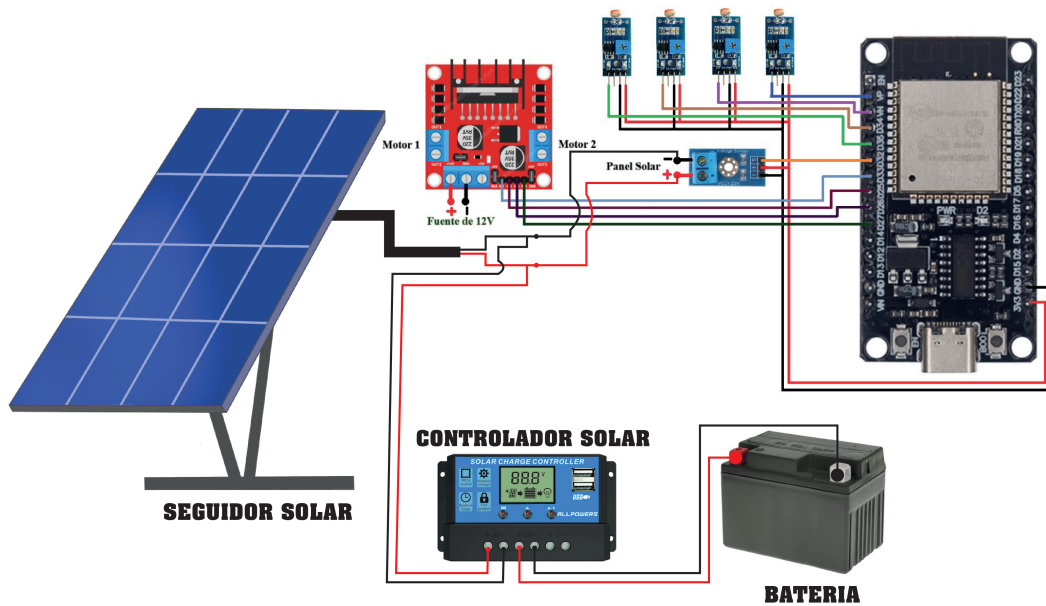


Figura 18: Diagrama de conexiones de los elementos con el ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

En la tabla X se muestran los requerimientos de tensión y corriente de todos los elementos del sistema. La mayoría de los motores están diseñados para funcionar con 12V o 24V, mientras que el ESP32 solo puede alimentarse con 3.3V y hasta 500 mA. Por ello, es ventajoso usar una fuente separada para los motores de alto voltaje, lo que garantiza eficiencia energética y protege al regulador de tensión de baja potencia contra sobrecargas.

Componente	Tensión	Corriente
ESP32	3.3V	500mA
Motores	12V/24V	1A cada uno
LDR Sensores	3.3V	50mA

Tabla X: Alimentación y Voltaje. Fuente: Autores.

VI-F. Desarrollo del Sistema de Control

VI-F1. Máquina de Estados para el Control del Sistema: En la figura 19 se aprecia cómo se describen los estados del sistema durante el funcionamiento y cómo se realizan las interacciones entre ellos. El estado INICIO es el momento en que el ESP32 configura los pines GPIO y establece la conexión a la red Wi-Fi. En el estado MOVIENDO IZQUIERDA, el sistema compara las lecturas del LDR ubicados a la izquierda y derecha de la plataforma. Según el resultado, el sistema mueve el motor horizontalmente hacia la izquierda para reducir la diferencia detectada. En el estado MOVIENDO DERECHA, ocurre el proceso opuesto: si el LDR del lado derecho detecta más luz, el sistema mueve la plataforma hacia la derecha para equilibrar. MOVIENDO ARRIBA se activa cuando se corrige la diferencia en la dirección vertical, basándose en las lecturas de los LDR ubicados en la parte superior e inferior. El sistema se mueve hacia arriba o hacia abajo para igualar las lecturas. Finalmente, en el estado SEGUIMIENTO, el sistema monitorea continuamente la luz y ajusta automáticamente los motores, asegurando que nunca permanezca estático.

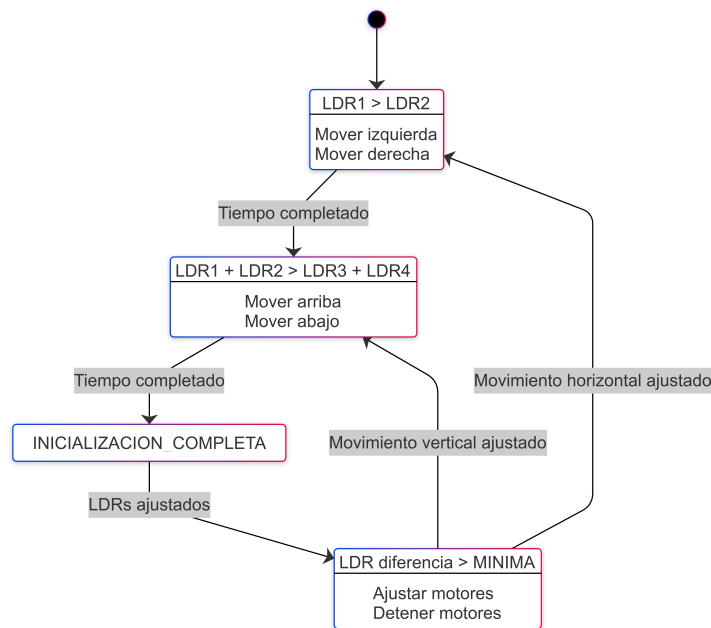


Figura 19: Diagrama de Máquina de Estados del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-F2. *Control de Motores:* La siguiente tabla XI presenta la configuración del control PWM aplicado a los motores. De acuerdo con la tabla presentada, se seleccionó la frecuencia a 1 kHz para que el motor funcione de manera suave y precisa evitando ruidos y vibraciones. Por otra parte, los valores mínimos y máximos del ciclo de trabajo le permiten cambiar la velocidad en función de las necesidades mencionadas.

Parámetro	Motor Horizontal	Motor Vertical
Frecuencia	1 kHz	1 kHz
Valor Min PWM	0 %	0 %
Valor Max PWM	100 %	100 %

Tabla XI: Parámetros de Control PWM. Fuente: Autores.

En la tabla XII se presentan los posibles estados operativos del sistema junto con las acciones correspondientes. Cada estado refleja una decisión basada en las lecturas actuales de los sensores; por ejemplo, puede implicar mover los motores en una dirección específica o detenerlos. Esta lógica asegura que el dispositivo siga el sol de manera eficaz mediante transiciones controladas.

Estado	Acción Realizada
MOVIENDO_IZQUIERDA	Mover motor horizontal izquierda
MOVIENDO_DERECHA	Mover motor horizontal derecha
MOVIENDO_ARRIBA	Mover motor vertical arriba
MOVIENDO_ABAJO	Mover motor vertical abajo

Tabla XII: Estados del Sistema. Fuente: Autores.

VI-F3. *Algoritmos de Control:* En la Figura 20 se encuentra un diagrama que describe las decisiones lógicas que el sistema realiza en función de las lecturas de los sensores LDR. Cuando se leen los valores de LDRs, el sistema ve si hay una gran diferencia de luz entre LDRs.

Si la diferencia es significativa, entonces el sistema decidirá si la luz está del lado izquierdo o del lado derecho, determinará en qué dirección orientar el motor. Ocurrirá algo similar para la orientación vertical, en la que el sistema decidirá si la luz es desde arriba o desde abajo y así determinar si el motor debería subir o bajar.

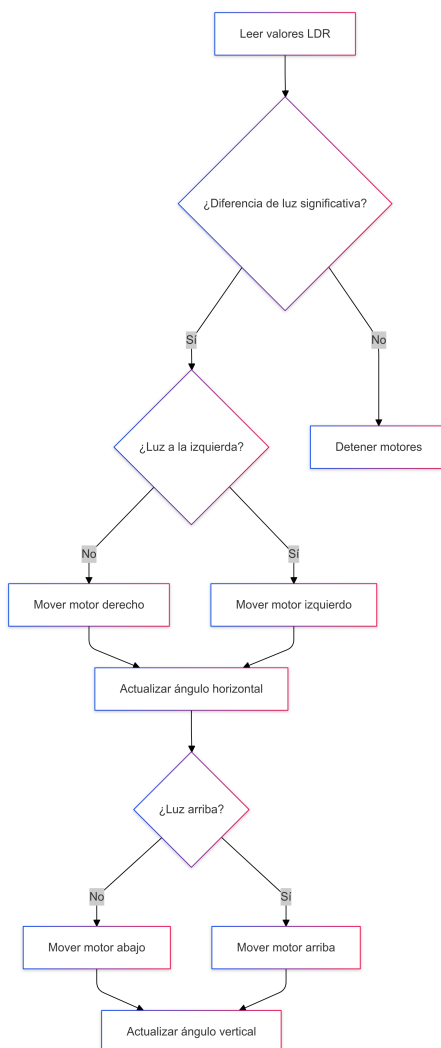


Figura 20: Diagrama de Árbol de Decisiones para el Control de Motores del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

El diagrama de la figura 21 a continuación describe las relaciones entre las principales entidades que, a su vez, son ESP32, LDRs, Motores y Cloud. De esta forma, el ESP32 se encuentra directamente relacionado con los LDRs para recibir las respectivas lecturas de luz y con los Motores para ajustar el movimiento de la plataforma en base a dichas lecturas.

Asimismo, el ESP32 también interactúa con el Cloud para enviar los datos de la posición de los motores y las lecturas de los LDRs. En este caso, el usuario puede acceder al sistema a través del dashboard y monitorear su dirección en tiempo real. Cada entidad se refiere a sus propios atributos y métodos, y dichas relaciones posibilitan que la información necesaria se transmita entre todos los elementos del sistema de seguimiento solar.

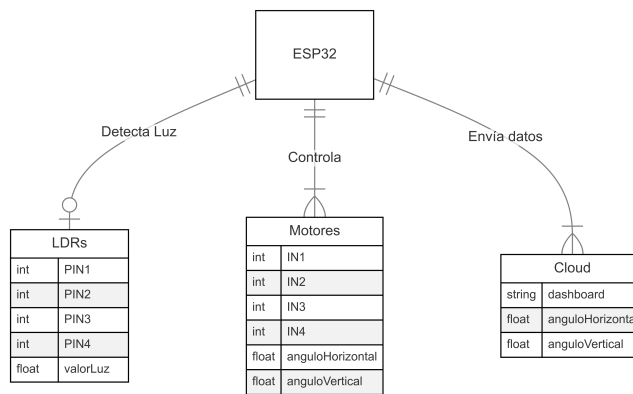


Figura 21: Diagrama de Relación entre Entidades del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-F4. Protocolo de Comunicación entre Componentes: El diagrama de flujo de la figura 22 muestra la secuencia de tiempo exacta de los eventos de interacción entre los diferentes componentes del sistema, que incluyen al usuario, el ESP32, los sensores LDR, los motores y la conexión con la nube de Arduino. El proceso comienza cuando el usuario abre la interfaz gráfica (GUI) en el panel de Arduino Cloud. Luego, la comunicación se establece una vez que el ESP32 conecta al router local a través de Wi-Fi, activando la conexión al servidor de la nube. A continuación, el ESP32 comienza a leer los valores de los sensores LDR conectados a sus pines analógicos, registrando la diferencia de luz detectada. Con esta información, el ESP32 decide mover los motores en los ejes horizontal o vertical. Al mover los motores, el ESP32 calcula la nueva posición y envía los comandos de control PWM a través de los pines de salida designados. Los motores ajustan la plataforma de acuerdo con las señales de control recibidas.

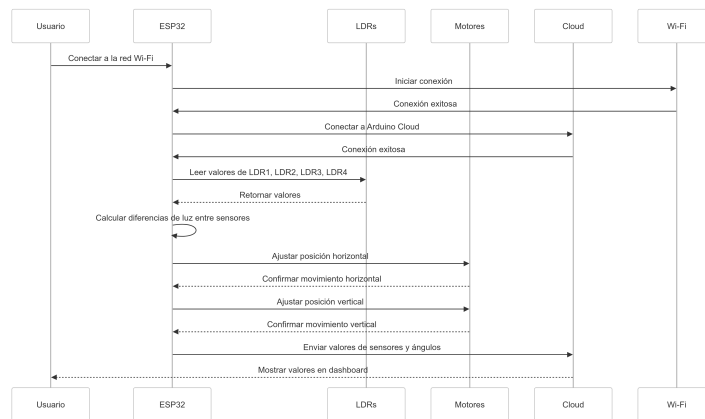


Figura 22: Diagrama de Secuencia de Comunicación del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-G. Arquitectura e Implementación del Software

VI-G1. Estructura de Clases del Sistema Integrado: En la figura 23 se presenta un diagrama de la estructura orientada a objetos del software. Se identifican las clases principales y sus relaciones. En este diagrama, la ESP32 actúa como la clase principal del programa. Se encarga de configurar los pines GPIO, gestionar el wifi, leer y procesar los datos de los sensores LDR, y operar los motores. Los atributos de esta clase son sensorLDR1, sensorLDR2, motorHorizontal y motorVertical. Los métodos incluyen la inicialización de todos los atributos, la lectura de los valores obtenidos de los sensores LDR y el movimiento de los motores en función de los valores. La

clase motores permite mover dichos dispositivos mediante los métodos moverIzquierda, moverDerecha, moverArriba y moverAbajo, que establecen las señales de los pines PWM necesarias para los movimientos. Por último la clase LDR se encarga de leer la luz captada por el sensor conectado a los pines analógicos del ESP32 y devuelve el valor obtenido a través de su respectivo método. Esta lectura se realiza de manera independiente y conforme a los valores registrados.

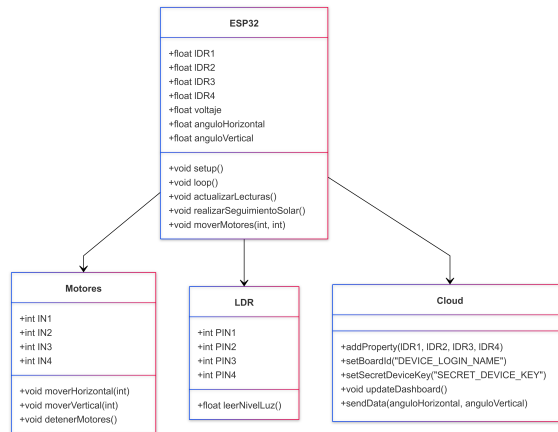


Figura 23: Diagrama de Clases del Sistema del ESP32 DEV Module. Fuente: Autores.

VI-G2. Diseño Orientado a Objetos del Sistema: En la figura 24 se presenta el sistema desarrollado en Python 3, que utiliza un enfoque de programación orientada a objetos. La clase principal del programa, ModernSolarTrackerGUI, interactúa con otras clases, como las de alarmas, análisis estadístico y conexión a la nube con Arduino. Este enfoque permitió diseñar un programa altamente modular, fácil de expandir y mantener. Además, el proyecto demostró que Python es un lenguaje potente y atractivo en el mundo de la programación, ya que permite el uso de características como las sugerencias de tipos (type hints), async/await y decoradores, lo que asegura un código eficiente y limpio.

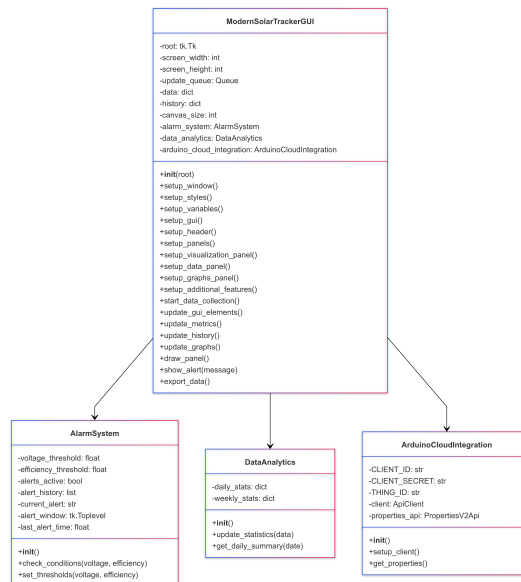


Figura 24: Diagrama de Clases, Diseño de Arquitectura Orientado a Objetos para un Sistema de Seguimiento Solar. Fuente: Autores.

El diagrama de estados, presentado en la Figura 25 representa el ciclo de vida del sistema, desde la inicialización hasta su operación continua. El estado central, MonitoreoActivo, siempre está en funcionamiento, gestiona un ciclo de lectura del sensor, procesamiento de datos, actualización de la GUI y verificación de alarmas. Desde un punto de vista práctico, para manejar la responsividad de la GUI, se usa un enfoque threading, con hilos independientes para la recolección de datos y procesamiento de datos. La comunicación entre los hilos está asegurada por el uso de una cola. Además, para preservar la integridad y evitar conflictos en los datos, la cola utilizada es thread-safe.

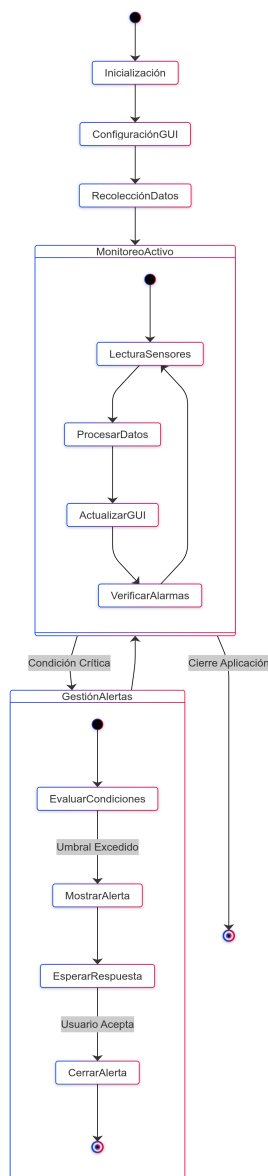


Figura 25: Diagrama de Estados Flujo Operativo del Sistema de Seguimiento Solar con Monitoreo en Tiempo Real. Fuente: Autores.

VI-G3. Integración con Plataforma IoT Arduino Cloud: En la tabla XIII se muestra la configuración de la red que permite al ESP32 conectarse a la nube de Arduino y transmitir información. La tabla detalla el nombre del SSID, la dirección IP asignada por el servicio de The Dynamic Host Configuration Protocol y el protocolo Internet Protocol, el cual se utiliza para transferir paquetes de IP en la red y adoptar una interconexión entre las redes de la nube de Arduino. La tabla asegura una comunicación más confiable al enviar y obtener información del usuario.

Parámetro	Detalle
SSID	Nombre de la red
IP	Asignada por DHCP
Puerto	80
Protocolo	TCP/IP

Tabla XIII: Wi-Fi y Comunicación Cloud. Fuente: Autores.

En la Tabla XIV describe los datos procesados y enviados al dashboard de Arduino Cloud. Las lecturas de los sensores y los ángulos de los motores se transmiten al usuario en tiempo real, lo que le permite monitorear el sistema y, si es necesario, realizar ajustes manuales. En este caso, la nube actúa como un intermediario entre el hardware y el usuario.

Dato	Descripción	Unidad
LDR1-LDR4	Lectura de luz por sensor	Lux
Ángulo Hor.	Ángulo motor horizontal	Grados
Ángulo Vert.	Ángulo motor vertical	Grados

Tabla XIV: Datos Arduino Cloud. Fuente: Autores.

VI-G4. Sistema de Monitoreo y Control en Python: El Diagrama de Secuencia de la figura 26 muestra cómo interactúan los componentes de un sistema. Para la solución propuesta, esta interacción se realiza a través del patrón Producer-Consumer, en el que Arduino Cloud produce los datos de sus sensores. A su vez, el consumidor GUI los consume y los muestra al usuario. Este enfoque permite manejar eficazmente el flujo de datos. La comunicación en tiempo real se garantiza con el uso de callbacks y eventos asíncronos, por lo que no hay riesgo de bloquear el sistema. Los datos se almacenan en buffers circulares, lo que minimiza la cantidad de memoria usada, dado que se guardan solo las medidas más recientes HistoryMask, con lo que se registra un historial suficiente sin necesidad de usar demasiados recursos.

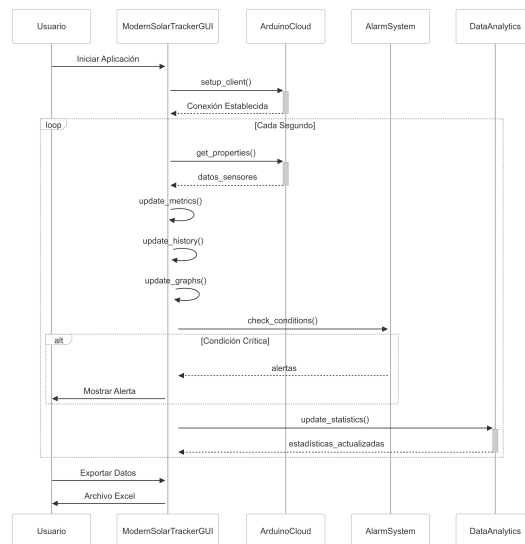


Figura 26: Diagrama de Secuencia Interacción entre Componentes del Sistema Solar Basado en Arduino Cloud y Python. Fuente: Autores.

La arquitectura del sistema, presentada en la figura 27, muestra un modelo llamado: Modelo-Vista-Controlador (MVC) modificado, diseñado específicamente para su uso en el monitoreo en tiempo real. La GUI, implementada

sobre customtkinter, una extensión moderna y flexible heredada de Tkinter, crea una interfaz gráfica de usuario que no solo es visualmente atractiva, sino también altamente responsiva a las demandas del usuario final. La arquitectura proporciona los esquemas necesarios para representar la información en tiempo real, tales como los de visualización, datos y gráficos. La capa de datos (modelo), que integra la "nube de Arduino", es responsable de la recolección y almacenamiento de datos provenientes de diversas fuentes y sensores. Por su parte, el controlador gestiona la separación entre la interfaz, la lógica de negocio y la recolección de datos, lo que no debe subestimarse. Es responsable de administrar las interacciones entre la GUI, los sensores y las acciones tomadas por el sistema. Gracias a su implementación modular, el sistema puede expandirse mediante la incorporación de nuevas funcionalidades o el cambio de componentes sin afectar al resto. Con un enfoque orientado a objetos, el sistema es modular y puede ser organizado mediante la combinación de clases correctamente definidas.

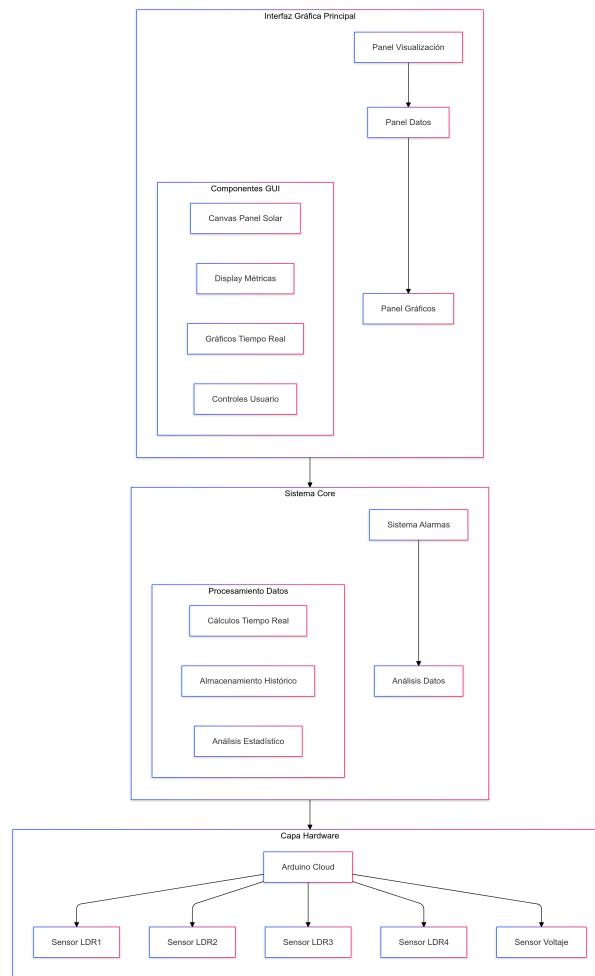


Figura 27: Diagrama de Componentes Arquitectura Modular del Sistema de Seguimiento Solar con Integración de Hardware y Software. Fuente: Autores.

En el diagrama de flujo de datos de la figura 28 detalla cómo los datos son procesados a medida que se introducen en el sistema desde los sensores. En primer lugar, las señales son capturadas utilizando dos tipos de sensores: LDR y el sensor de voltaje. Los datos se convierten en un número de pasos, donde se normalizan las medidas, es decir, los valores capturados son escalados de tal manera que todas las medidas estén en el rango estándar [0, 1]. Se calcula la eficiencia, que es una medida de cómo el seguidor solar está haciendo su trabajo, es decir, cuánta luz ha sido recolectada. También, se observa las tendencias, es decir, los resultados que se calculan a lo largo del tiempo. Por último, el sistema envía alertas si las condiciones bajo las cuales funciona correctamente están fallando, por

ejemplo, si la eficiencia ha caído por debajo de un cierto umbral definido. Los resultados del paso de cálculo son procesados utilizando NumPy y Pandas, mientras que la visualización en tiempo real de todas las métricas calculadas es procesada a través de Matplotlib. El sistema procesa en tiempo real los datos y las métricas establecidas. Para asegurarse de que el sistema tenga suficiente memoria y no sobrecargue el procesador, se define un búfer circular. Si los datos no se necesitan, son borrados de la memoria. Además, el sistema permite a los usuarios exportar los datos en formato Excel.

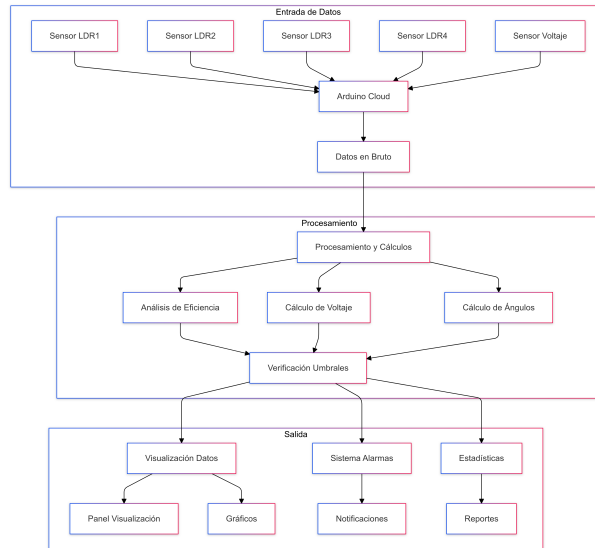


Figura 28: Diagrama de Flujo de Procesamiento de datos y Visualización de Información en Tiempo Real para el Seguimiento Solar. Fuente: Autores.

VI-H. Desarrollo de la Interfaz de Usuario

En la tabla XV se muestra cómo se representan los elementos de la aplicación en la interfaz gráfica del dashboard en Arduino cloud. Se puede observar que la aplicación muestra gráficos en tiempo real de los datos obtenidos por los sensores y de los ángulos actuales de los motores. También se puede ver la opción de controlar el sistema manualmente. Como se puede ver, este tipo de interfaz es muy útil, ya que ofrece los medios para controlar el sistema y realizar ajustes según las necesidades del usuario.

Elemento	Descripción
Gráfico LDR	Muestra los valores de los sensores
Ángulo Motor	Muestra los ángulos de los motores
Control Manual	Ajuste manual de los motores

Tabla XV: Interfaz de Usuario. Fuente: Autores.

VII. RESULTADOS

VII-A. Análisis estático

VII-A1. *Estudio de tensión Von Mises:* En la Figura 29 el criterio de Von Mises, empleado en el análisis por elementos finitos, es una herramienta esencial para predecir la ocurrencia de fallas en materiales dúctiles como los utilizados en los soportes de seguidores solares. Al discretizar la estructura en una malla de elementos finitos, este método permite calcular la tensión equivalente en cada punto, lo cual representa una medida de la tendencia del material a deformarse.

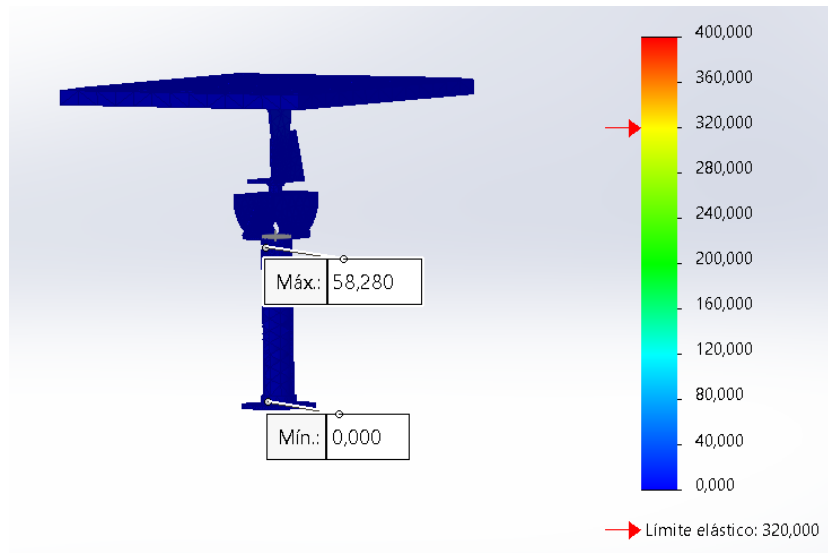


Figura 29: Análisis estático de Von Mises en la estructura del seguidor solar. Fuente: Autores.

En la presente investigación, la tensión de Von Mises es, por tanto, la que permite conocer las zonas más solicitadas de la estructura, dado que se identifica con las zonas de mayor color rojo en la representación gráfica de los resultados. Esta información es clave para dar una respuesta a las preguntas de seguridad y optimización de la estructura, dado que asegura que el soporte pueda ser capaz de soportar la carga a la que estará sometido para durante su vida útil.

La figura anterior revela que el límite elástico alcanzado en la estructura de rastreo solar fue de 8.582 MPa. Este valor se encuentra considerablemente por encima de la tensión máxima registrada durante el análisis, lo que indica que la estructura está operando bajo condiciones de muy baja tensión. Este amplio margen de seguridad asegura que la estructura pueda realizar los movimientos asignados sin sufrir deformaciones permanentes o fallas estructurales. Además, garantiza que la estructura pueda resistir cargas imprevistas o variaciones en las condiciones ambientales sin comprometer su integridad.

VII-B. Análisis de desplazamiento

Mediante el análisis por elementos finitos se ha determinado que la estructura de rastreo solar, como se muestra en la Figura 30 bajo una carga de 22,563 N y a la vez siendo sometida a unos movimientos de giro e inclinación, presenta unos desplazamientos mínimos. Los resultados, como se muestra en la Figura 30, nos revelan que la estructura tiene una suficiente rigidez para soportar las cargas a la que es sometida, sin que aparezcan deformaciones tan grandes que eliminen la funcionalidad de la misma.

La certeza de este análisis se basa en la posesión de un modelo de elementos finitos muy bien hecho y en la aplicación de unas condiciones de contorno coherentes, lo que que proporciona una total confianza en los resultados finales que se han conseguido.

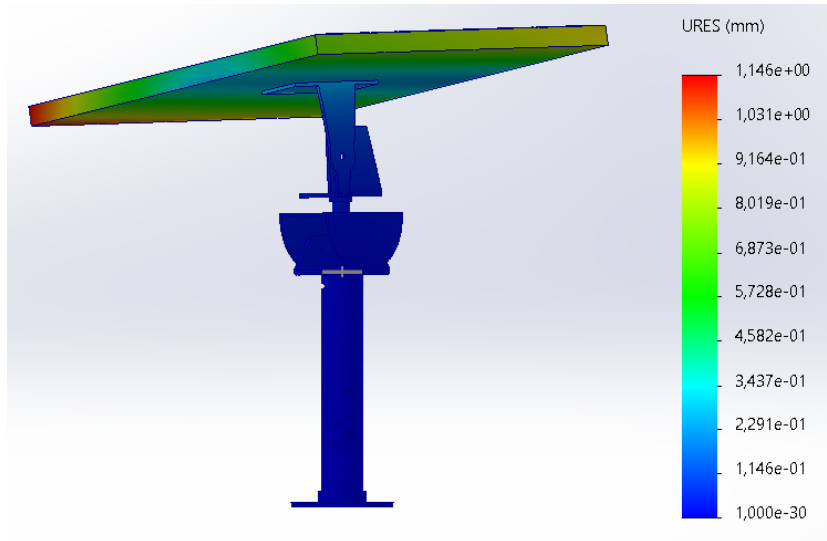


Figura 30: Análisis de desplazamiento de la estructura. Fuente: Autores.

VII-C. Análisis de deformación

El la Figura 31 se muestra análisis de deformación aplicado a la estructura de rastreo solar, señala una deformación relativamente baja. El valor indicado es de $5,209e-05$, señala una ligera deformación ante la carga aplicada sobre la estructura. Este valor relativamente señala que la estructura soporta el trabajo de los movimientos asignados con la carga dispuesta y afirma la robustez y estabilidad a los giros que desarrolla la estructura a la iteración con el sol.

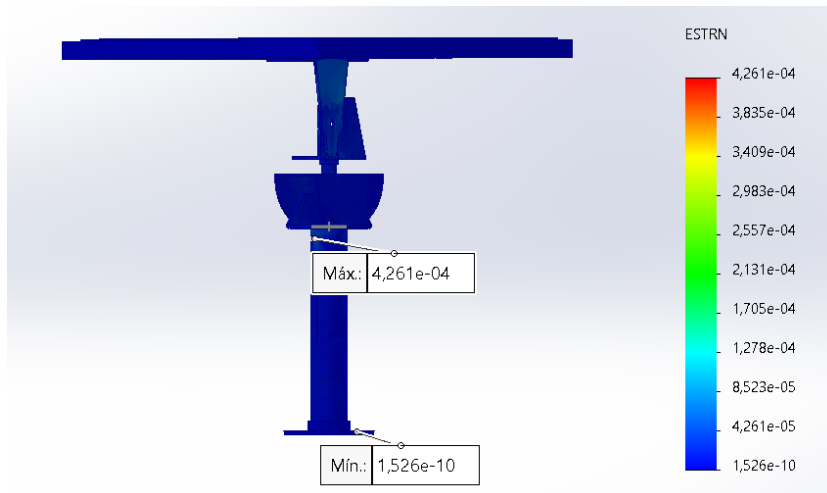


Figura 31: Análisis de deformación de la estructura. Fuente: Autores.

VII-D. Análisis factor de seguridad

$$F.S. = \frac{\text{límite elástico}}{\sigma_{\text{diseño}}} = \frac{320\text{MPa}}{58,28} = 5,49$$

El análisis de elementos finitos como se muestra en la Figura 32 ha permitido determinar que la estructura del seguidor solar posee un factor de seguridad de 5.49, lo que indica una capacidad de carga significativamente superior a los requisitos de diseño, Estos valores son tomado en cuenta al límite elástico que puede soportar el material antes de romperse. Este valor elevado se debe a una combinación de factores, como la selección de materiales de alta resistencia, la optimización de la geometría de la estructura y la aplicación de un factor de seguridad adicional en el diseño. La alta resistencia de la estructura garantiza su capacidad para resistir cargas dinámicas, como el viento.

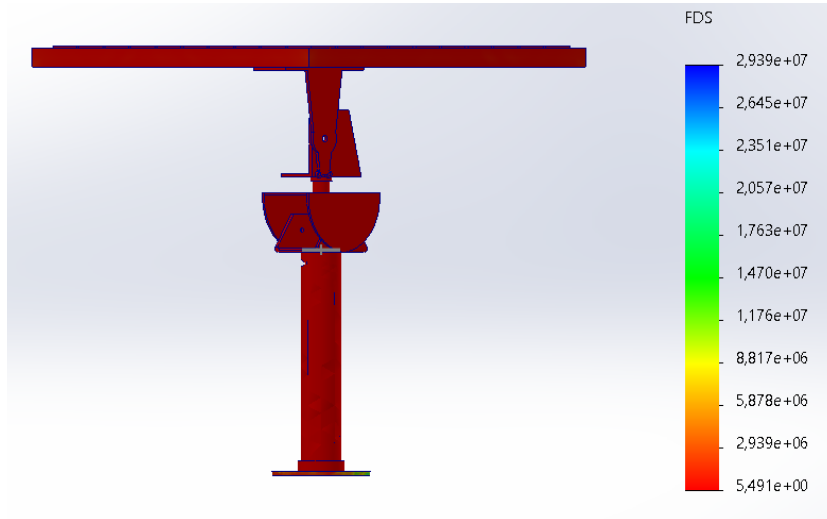


Figura 32: Análisis de factor de seguridad. Fuente: Autores.

En la tabla XVI se muestran los resultados del estudio estático que se realizó sobre la estructura del seguidor solar. El valor del esfuerzo de Von Mises, que nos da una idea de cómo se distribuyen las tensiones en el material, es de 8.582 MPa. Este número nos indica que la estructura no está sometida a grandes tensiones, lo cual es positivo. Por otro lado, el análisis de desplazamiento revela que la estructura se mueve un máximo de 1,146 mm bajo las cargas aplicadas, lo que significa que la deformación es prácticamente imperceptible. Además, la deformación unitaria, que mide cuánto se estira o comprime el material, es de 4.261e-04, un valor muy pequeño que confirma que la estructura se mantiene estable. Finalmente, el factor de seguridad, que nos dice cuánto más resistente es la estructura en comparación con las cargas que soporta, es de 5.49. Esto significa que la estructura tiene un amplio margen de seguridad, lo que garantiza que funcionará de manera segura y confiable en condiciones normales.

Resultados	Valor
Esfuerzo equivalente Von Mises	8.582 MPa
Análisis de desplazamiento	1,146e-00 mm
Análisis de deformación	4.261e-04
Análisis de factor de seguridad	5.49

Tabla XVI: Resultados del estudio estático de la estructura del seguidor solar. Fuente: Autores.

VII-E. Análisis de la interacción del viento sobre la estructura

Con el objetivo de simular de manera realista las condiciones de viento a las que estará expuesta la estructura, se ha definido un perfil de flujo de aire en el módulo de condiciones iniciales y ambientales del software de simulación. Tal como se observa en la Figura 33, se ha establecido una velocidad del viento de 30 km/h en las direcciones X y Z, lo que equivale a aproximadamente 8.33 m/s. Esta configuración simula un viento que incide sobre la estructura de forma diagonal, generando un flujo tridimensional alrededor de esta.

A partir de la fijación de estos parámetros se buscan reproducir las condiciones reales de servicio, es decir, se evalúa la respuesta estructural bajo las cargas aerodinámicas inducidas por el viento, y se pueden detectar las zonas críticas, en la que se concentran los mayores esfuerzos y las mayores deformaciones, así como las flexiones, los cortantes y las torsiones. Se trata de información fundamental para determinar la seguridad y la durabilidad de la estructura, puesto que permite detectar posibles puntos débiles o zonas especialmente propensas a la fatiga.

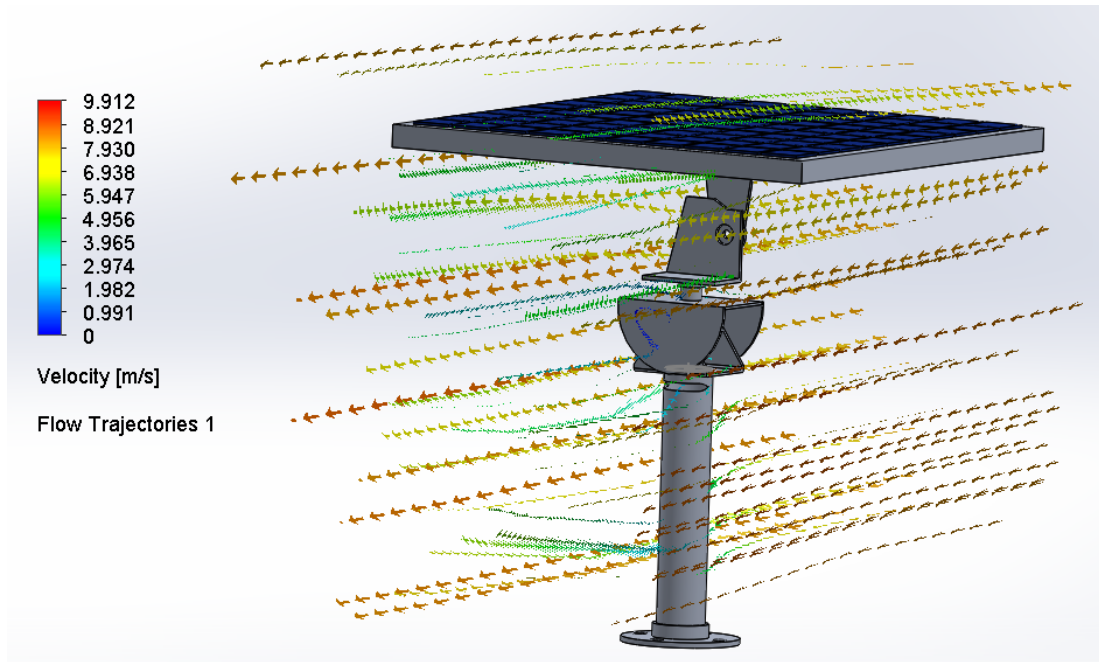


Figura 33: Diagrama de flujo de aire a 30 km/h. Fuente: Autores.

La ilustración presenta el análisis del flujo computacional mediante simulación del comportamiento de un seguidor solar expuesto a un flujo de aire a 30 km/h. En las líneas de corriente se puede observar el patrón de flujo alrededor de la estructura, dado que se permita ver zonas de alta y baja velocidad. La escala se representa mediante colores que indican la magnitud de la velocidad del aire en cada punto, en la que los colores más cálidos hacen referencia a la magnitud mayor. Este análisis permite obtener zonas de alta presión y zonas de baja presión alrededor del seguidor, además de ofrecer información de las fuerzas aerodinámicas a las que se encuentra la estructura sometida. Al cruzar esta información con los resultados de los datos estructurales se puede acceder a la resistencia de la estructura debido en gran parte a las cargas del viento e intentar optimizar el diseño del seguidor solar para minimizar la resistencia aerodinámica y maximizar el rendimiento del sistema de seguimiento solar.

VII-F. Montaje Final del Seguidor Solar: Sistema Completo y en Funcionamiento

El sistema de seguidor solar como se observa en la Figura 34 esta completamente ensamblado y puesto en funcionamiento con todos los componentes integrados en la PCB, los sensores, el microcontrolador y los motores que trabajan en conjunto a la estructura de manera eficiente. Este montaje final refleja el funcionamiento de manera correcta al momento de hacer las pruebas en el entorno real.



Figura 34: Montaje del seguidor solar. Fuente: Autores.

VII-G. Conexiones de los componentes del seguidor solar en la pcb

En la Figura 35 se pueden ver las conexiones de cada componente en la PCB. Hacerlo de esta manera no solo le da al circuito un aspecto más limpio y profesional, sino que también nos ayuda a mantener todo en orden. Al organizar bien los cables y asegurar los componentes, evitamos que se muevan o se suelten, lo que podría causar problemas más adelante. Además, tener todo bien conectado y sujeto hace que el diseño sea más confiable y fácil de entender.

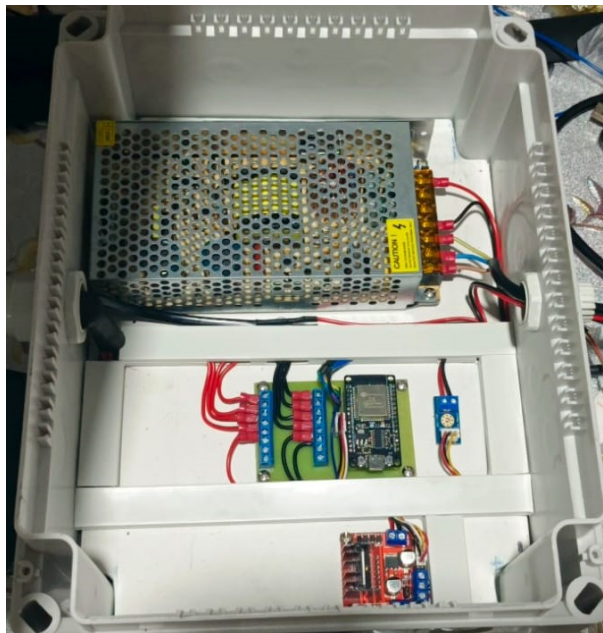


Figura 35: Conexiones en la pcb. Fuente: Autores.

VII-H. Ejecución y visualización de la plataforma Arduino Cloud IoT para el monitoreo del seguidor solar.

En la Figura 36 se muestra cómo la plataforma Arduino Cloud IoT fue una herramienta clave para monitorear el seguidor solar, permitiéndonos observar y analizar su comportamiento en tiempo real. A través de esta plataforma, fue posible visualizar datos importantes, como el voltaje del seguidor solar, el voltaje del panel fijo y los valores obtenidos de los sensores LDR. Además, la opción de exportar esta información facilitó el análisis comparativo entre ambos paneles, lo que nos ayudó a entender mejor su rendimiento y eficiencia.

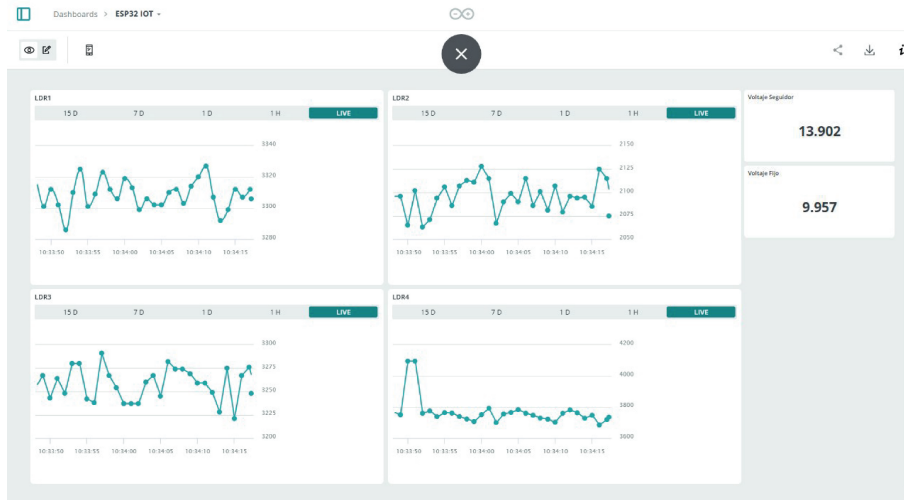


Figura 36: Plataforma de monitoreo Arduino Cloud IoT. Fuente: Autores.

VII-I. Ejecución y visualización de la interfaz gráfica realiza en Python Thonny para el monitoreo del seguidor solar

En la Figura 37, se observa el entorno de Python Thonny, donde se desarrollo el código de programación en el lenguaje de python 3, a continuación se observa las librerías que usamos para la creación de la interfaz gráfica, las cuales fueron esenciales para dar forma a la herramienta visual que necesitábamos.

```
Thonny - D:\USUARIO\ESCRITORIO\anteproyecto\CODIGO FINAL\SUPERSUPERMEJORADO.py @ 878 : 20
Fichero Editar Visualizar Ejecutar Herramientas Ayuda
Argumentos del programa:
SUPERMEJORADO.py
1 import tkinter as tk
2 from tkinter import ttk,filedialog
3 import threading,time,queue
4 from math import cos,sin,radians
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
7 import customtkinter as ctk
8 from oauthlib.oauth2 import BackendApplicationClient
9 from requests_oauthlib import OAuth2Session
10 import iot_api_client as iot
11 from iot_api_client.configuration import Configuration
12 from iot_api_client.api import PropertiesV2Api
13 from datetime import datetime
14 import pandas as pd
15
16
17 class AlarmSystem:
18     def __init__(self):
19         self.voltage_threshold = 10.0
20
21
22 >>> %Run SUPERSUPERMEJORADO.py
Python 3 local - El Python de Thonny
```

Figura 37: Ejecución del Código en python. Fuente: Autores.

En la Figura 38 se observa la interfaz principal del programa, en la cual tenemos varias características divididas por secciones como, la orientación del panel en 2D, ángulos del movimiento del panel, métricas en tiempo real del voltaje, eficiencia, potencia, sección de monitoreo de los LDR, alarmas, estadísticas diarias, exportar datos en formato xlsx de excel, la sección de gráficas que nos muestra el voltaje, ángulo y eficiencia.

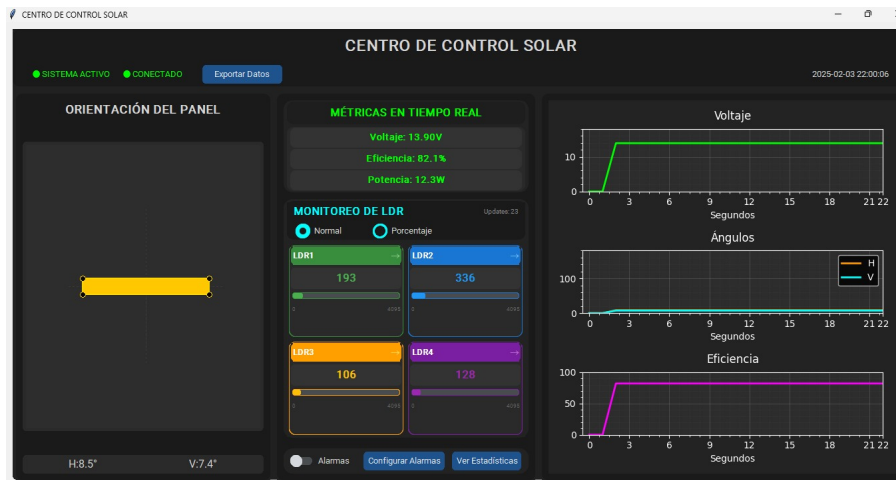


Figura 38: Interfaz Gráfica en python. Fuente: Autores.

VII-J. Análisis de datos del seguidor solar en entorno real

Este es un gráfico temporal multiparamétrico que nos presenta los voltajes del seguidor y del sistema fijo. Del mismo modo, también se muestra las corrientes del seguidor y del panel fijo. Se puede observar esto a lo largo de los tres ciclos del día completos. A partir del gráfico, se aprecia que el seguidor mantiene un voltaje más alto a lo largo del día. Hacia el mediodía, cuando la intensidad solar es mayor y se genera más energía, el voltaje y la corriente también se elevan, evidenciando su relación directa.

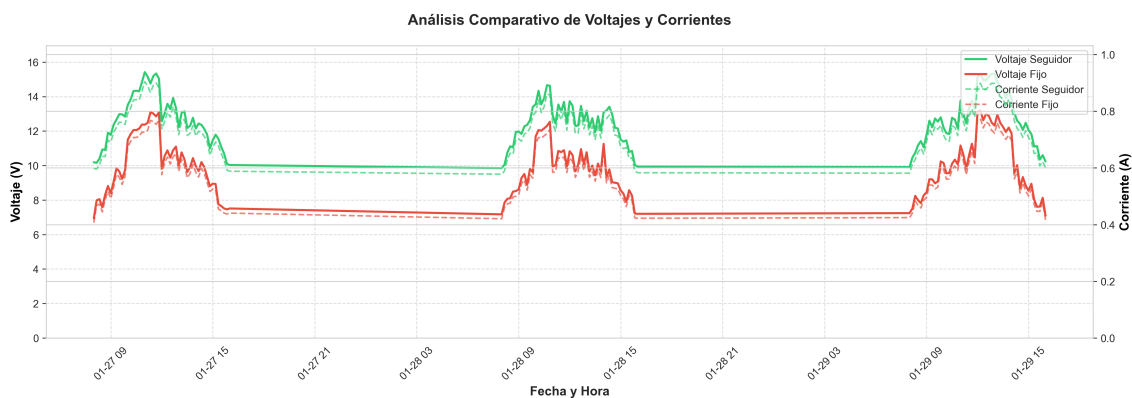


Figura 39: Análisis Comparativo de Voltajes y Corrientes. Fuente: Autores.

Este gráfico muestra la potencia generada a lo largo del tiempo, con una línea punteada negra en 15 W como límite máximo. Se puede apreciar que el seguidor está generando más potencia en comparación con el sistema fijo. Los picos de potencia se presentan durante las horas del día con más luz, llegando a los 13 W en el seguidor y a 9.80 W en el sistema fijo. El valor base para la noche es prácticamente el mismo para ambos sistemas y tiene una apariencia muy repetida en los tres días mostrados.

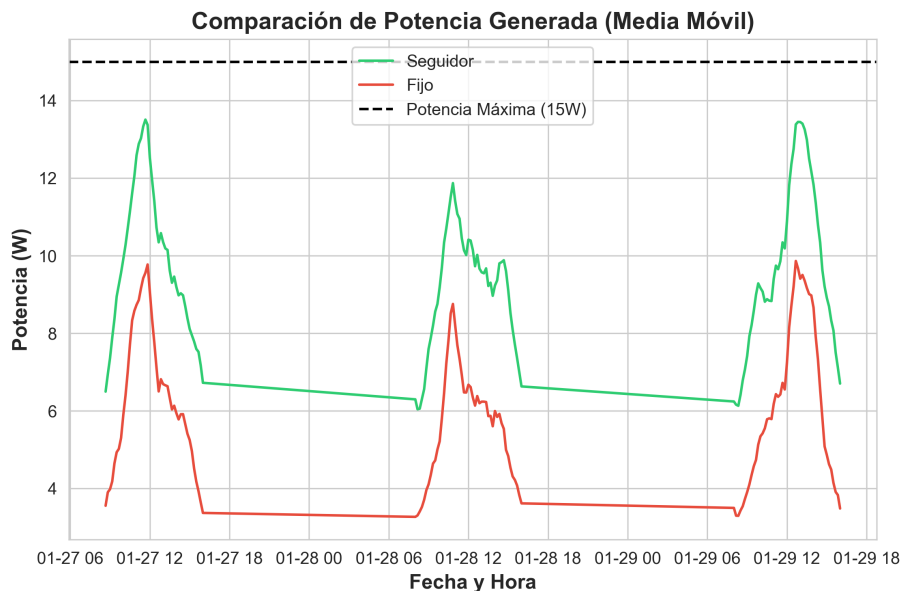


Figura 40: Comparación de Potencia Generada (Media Móvil). Fuente: Autores.

Este gráfico de barras compara la potencia promedio diaria de ambos sistemas. El seguidor mantiene valores más altos en comparación con el sistema fijo, con una diferencia de aproximadamente desde los 3 a 4 W en promedio. Las variaciones diarias son mínimas, mostrando un comportamiento constante en los días analizados.

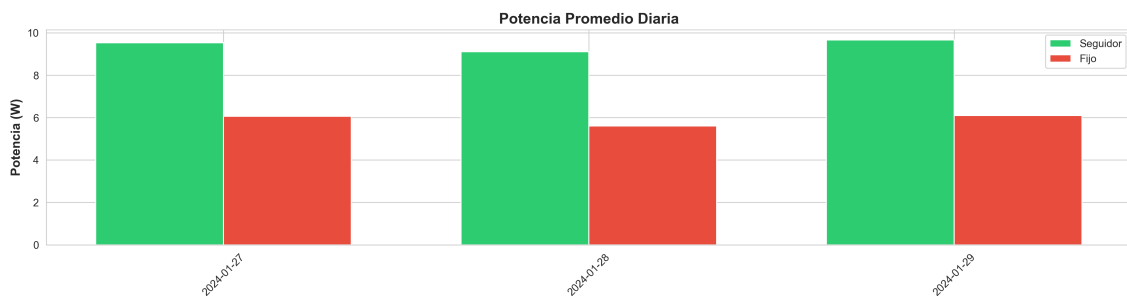


Figura 41: Potencia Promedio Diaria. Fuente: Autores.

Este gráfico muestra la corriente nominal de referencia, siendo 0,938 A, además de valores máximos determinados por día para ambos sistemas. En la línea inferior del gráfico, el seguidor presenta valores entre un 10 y un 20 por ciento más alto que el sistema fijo respecto al eje vertical. Si bien puede notarse un leve descenso en los valores máximos a lo largo del tiempo, las mediciones del seguidor son relativamente constantes.

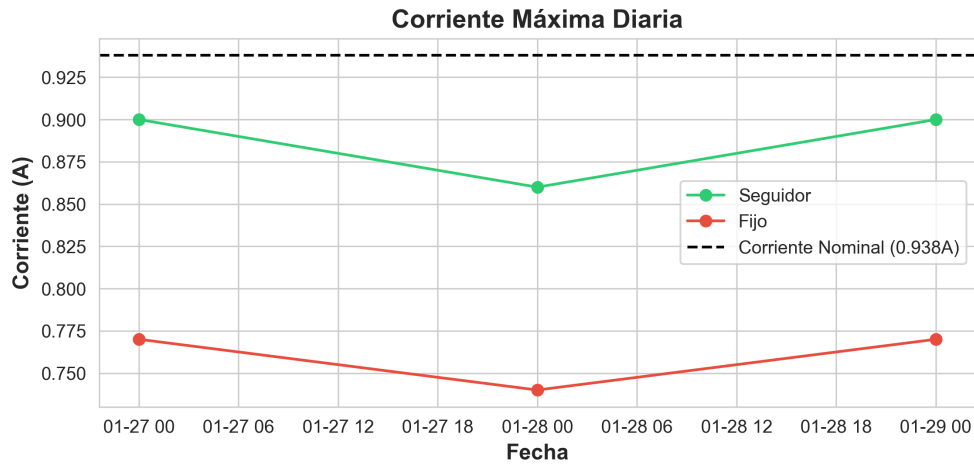


Figura 42: Corriente Máxima Diaria. Fuente: Autores.

Este diagrama de cajas muestra cómo se distribuye la eficiencia relativa en porcentaje. La caja indica el rango central, la línea horizontal dentro de la caja es la mediana, y los "bigotes" muestran los valores mínimo y máximo. Los puntos fuera de los bigotes son valores extremos. La eficiencia es más alta, alrededor del 40 por ciento, y se pierde menos energía en las horas tempranas (8:00 am – 9:00 am) y al final (10:00 am – 16:00 pm). Los valores centrales (20-25 por ciento) son promedio en comparación con las horas cercanas al mediodía. Esto se debe a que el seguidor captura más energía en ángulos más inclinados, lo que también causa una mayor desviación.

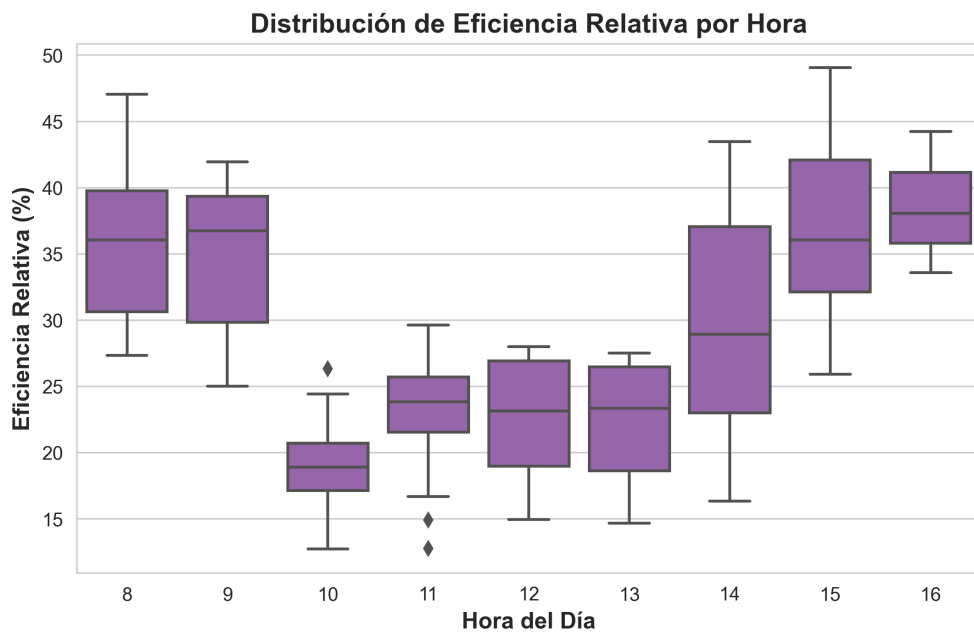


Figura 43: Distribución de Eficiencia Relativa por Hora. Fuente: Autores.

Este gráfico de barras nos indica la eficiencia cada día, variando en el intervalo del 27 a 29 por ciento. La diferencia entre días es muy pequeña, pero en el segundo día es más alta. Se observa que la cantidad fue consistente todo el tiempo.

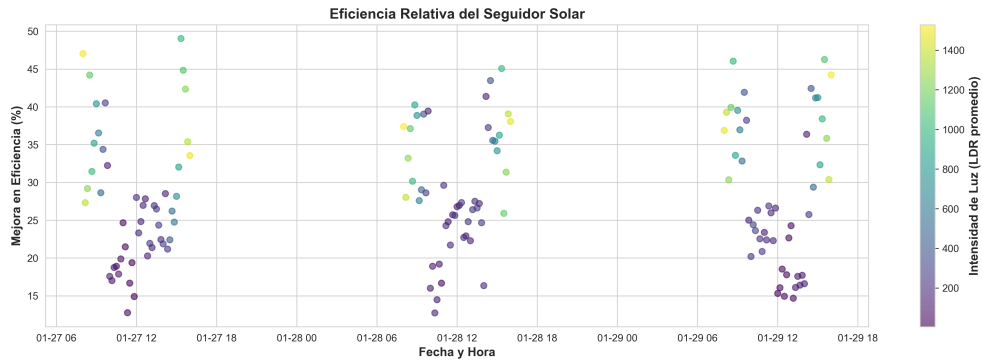


Figura 44: Eficiencia Relativa del Seguidor Solar. Fuente: Autores.

Se representa el porcentaje sobre la eficiencia relativa en el eje Y en función de esta última. Los colores más claros apuntan a horas de intensidad lumínica. Hay patrones que varían en un rango entre el 10% y el 45%. Los puntos más blancos suelen ocurrir en el periodo central de cada jornada. La intensidad de la luz tiene una influencia, hasta cierto punto, sobre los niveles de eficiencia, mostrando siempre que, por repetir pautas, existe una secuencia en distintos días.

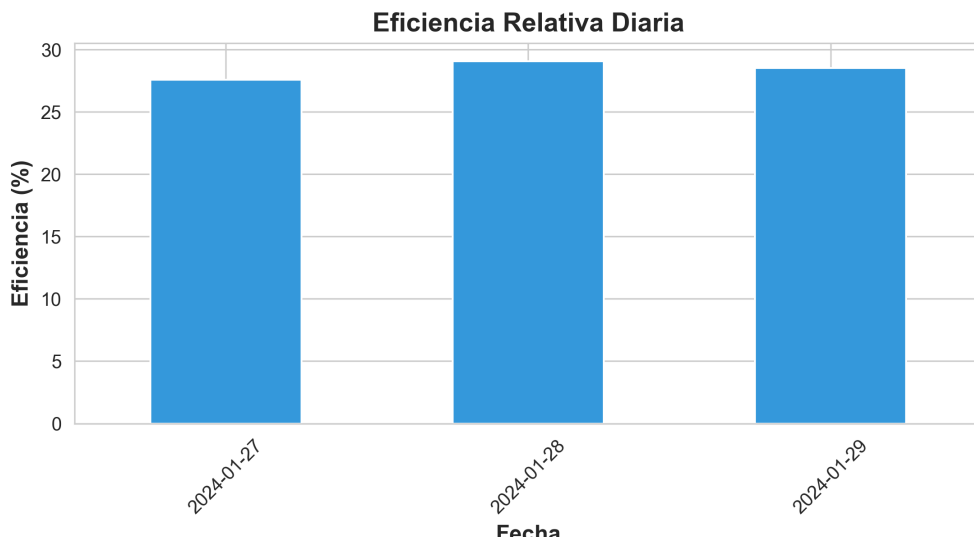


Figura 45: Eficiencia Relativa Diaria. Fuente: Autores.

La figura representa a histograma de la potencia. Como se puede ver en el recurso, el gráfico enseña la frecuencia de varios valores de mejora en la potencia. Se puede notar que la media es de aproximadamente 3.51 W porque la línea roja está ubicada a esa altura y a este valor en el eje vertical. También, la forma es aproximadamente normal y desplazada por la derecha. Los datos principales comprenden, aproximadamente, desde 2.8 W hasta 4.0 W, y las colas abarcan desde 2.5 W hasta 5.0 W. La mayoría de los datos están ubicados alrededor de 3.51 W; por eso, se puede analizar la variabilidad por este indicador.

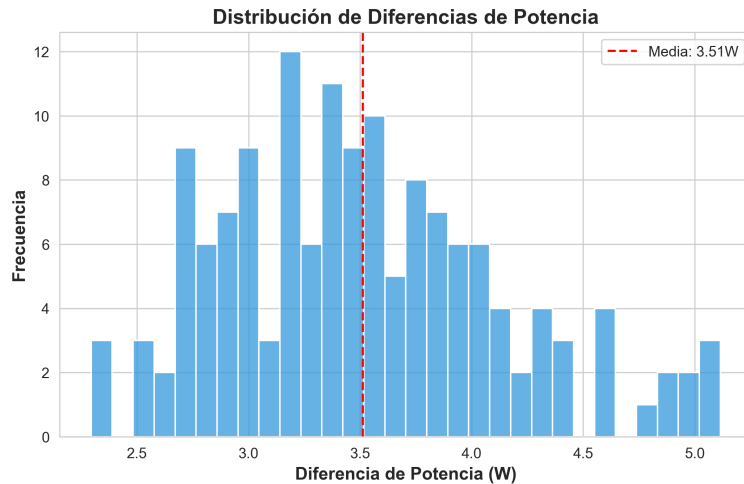


Figura 46: Distribución de Diferencias de Potencia. Fuente: Autores.

En este gráfico de dispersión se representa la intensidad de luz medida por el LDR y la potencia generada. Se aprecia una relación inversamente proporcional entre el LDR y la potencia. Los datos se dividen en dos clases: seguidor solar y panel fijo. Se observa una mayor dispersión en los valores intermedios de luz, así como una cantidad menor de potencia generada en el seguidor respecto al panel fijo. Aunque la relación no es perfectamente lineal se aprecia claramente cómo la potencia aumenta cuando el LDR disminuye. La línea de tendencia para el seguidor solar tiene una mayor pendiente, reflejando sus mayores potencias para un mismo valor de LDR.

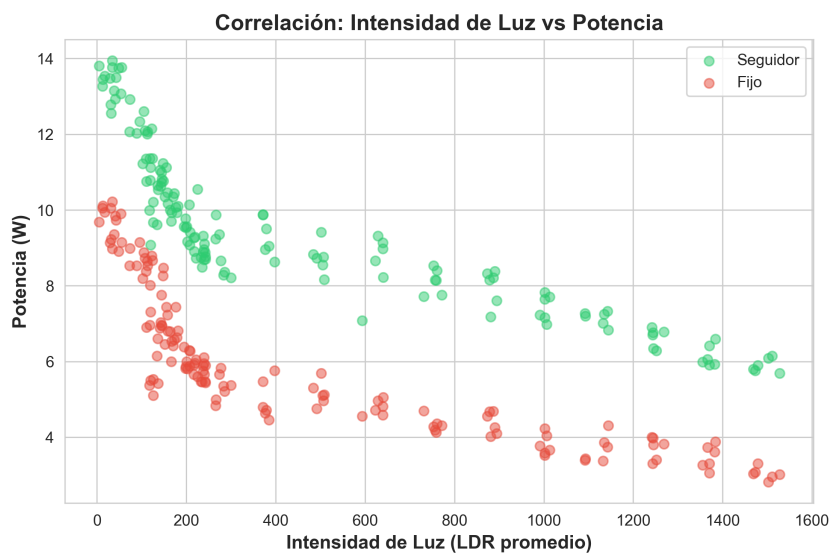


Figura 47: Correlación entre Intensidad de Luz y Potencia. Fuente: Autores.

El siguiente gráfico ilustra el balance de energía acumulada, expresada en kWh, de ambos sistemas. Se observa que el seguidor acumula energía a un ritmo más rápido que el sistema fijo y la diferencia entre ambos se incrementa considerablemente con el tiempo. Al final del tiempo simulado, ambos sistemas logran acumular energía, pero el seguidor alcanza aproximadamente los 32 kWh, mientras que el sistema fijo llega a unos 20 kWh. La pendiente de la línea del seguidor es considerablemente más pronunciada que la del sistema fijo.

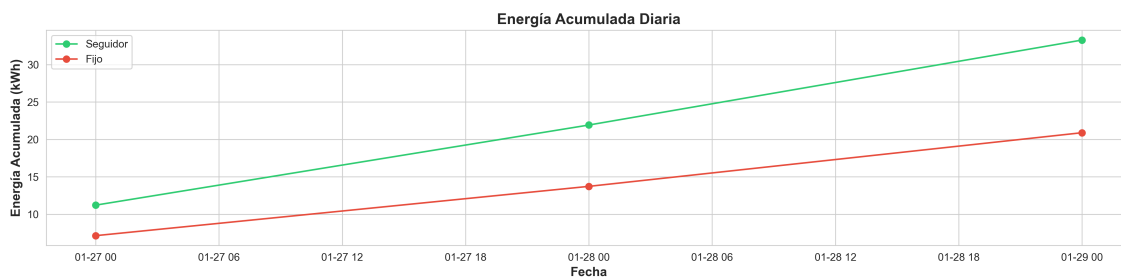


Figura 48: Energía Acumulada Diaria. Fuente: Autores.

VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de actividades en la Figura XVII.

Tabla XVII: Cronograma. Fuente: Autores

		Cronograma de actividades																										
		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero								
#	Actividad	Fecha de inicio	Fecha final	Estado	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	Selección del tema	06/05/2024	17/05/2024	Completado	█																							
1	Aceptación del tema para anteproyecto	20/05/2024	29/06/2024	Completado		█	█	█																				
2	Planificación para el desarrollo de la investigación	01/07/2024	05/07/2024	Completado					█	█	█																	
3	Planteamiento de objetivos específicos y generales	08/07/2024	27/7/2024	Completado						█	█																	
4	Análisis de identificación de problemática	15/8/2024	21/8/2024	Completado							█	█																
5	Desarrollo de metodología de investigación	27/8/2024	25/8/2024	Completado								█	█															
6	Desarrollo de cronograma de actividades	6/9/2024	29/9/2024	Completado									█	█														
7	Investigación de la lista de componentes y materiales necesarios	8/10/2024	22/10/2024	Completado										█	█													
8	Planificación de presupuesto necesario	24/10/2024	29/10/2024	Completado											█	█												
9	Requisición de componentes y materiales	15/11/2024	28/11/2024	Completado												█	█											
10	Diseño de ensamble de placa de prototipo	21/11/2024	25/11/2024	Completado													█	█										
11	Diseño de ensamble de placa de prototipo	27/11/2024	06/12/2024	Completado														█	█									
12	Diseño de plano para conexión eléctrica y electrónica del sistema	09/12/2024	14/12/2024	Completado															█	█								
13	Construcción y ensamblado del sistema de seguimiento	16/12/2024	18/12/2024	Completado																█	█							
14	Elaboración de programación para el sistema	19/12/2024	24/12/2024	Completado																	█	█						
15	Elaboración de programación para el sistema	06/01/2025	28/02/2025	Completado																		█	█					
16	Desarrollo de los resultados obtenidos	10/01/2025	19/01/2025	Completado																			█	█				
17	Redacción de los resultados obtenidos	21/01/2025	22/01/2025	Completado																				█	█			
18	Planteamiento de conclusiones	24/01/2025	26/01/2025	Completado																					█	█		
19	Revisión técnica y corrección de fallos del proyecto	27/01/2025	27/01/2025	Completado																						█	█	
20	Segunda revisión técnica y corrección de fallos del proyecto	29/01/2025	30/01/2025	Completado																							█	
21	Implementación final de correcciones del proyecto	18/01/2025	30/01/2025	Completado																							█	
22	Implementación final de correcciones del proyecto	01/02/2025	07/02/2025	Completado																							█	
23	Redacción de resultados de eficiencia obtenidos	17/02/2025	22/02/2025	No iniciado																							█	
24	Presentación final del proyecto																										█	

IX. PRESUPUESTO

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor total
Esp32 Wroom 32	Microcontrolador	2	25 \$
Modulo L298N	Controlador de motores	1	3.75 \$
Modulo LDR	Sensor fotorresistencia	4	8 \$
Modulo FZ0430	Sensor de voltaje	2	3.70 \$
Fuente conmutada	12v a 12.5 A	1	16.75 \$
Cable para fuente	1.50m	1	1.50 \$
Piezas del seguidor de doble eje	Aleación de aluminio + placa de acero de 3mm/0.1	1	60 \$
Panel Solar 15Wp - 12VDC	Policristalino RESUN	2	50 \$
Cable para conexión	10 m Rojo	1	1.30 \$
Cable para conexión	10 m Regro	1	1.30 \$
Cable para conexión	10 m Azul	1	1.30 \$
Termoencogible	2.0mm, 3.0mm	1	3 \$
PCB	Placa para conexiones	1	11.20 \$
Caja de paso rectangular	31cm x 24cm	1	26.13 \$
Espiral plástico 12mm	10 metros	1	2.25 \$
Base del panel	Corte y pulida	1	4.25 \$
Canaleta	Cuadrada 20x12	1	1 \$
Batería	12v 2.5A	1	12.50 \$
Controlador Solar	12v-24v 70A	2	20 \$
Impresión 3D	Soporte de LDR	6	12 \$
DC Motor JGY-370	12v 6 RPM	2	24.30\$
Borneras	Pequeñas	8	1.60 \$
Mesa	estructura para el seguidor solar	1	20 \$
TOTAL			310.83\$

X. CONCLUSIONES

Se realizó el diseño de la estructura del seguidor solar mediante el software de modelado CAD, en el cual se determinó la estructura y componentes adecuados para un correcto funcionamiento. Se realizaron análisis estático y de viento, lo cual dieron resultados favorables indicando la viabilidad de la estructura ante ese tipo de entornos.

Se implementó el sistema de seguimiento solar mediante el uso de sensores LDR, los cuales permiten determinar de forma automática la orientación del panel solar fotovoltaico, en base a la posición del sol. Este sistema genera una mayor captación de la radiación solar, lo cual equivale a una mayor eficiencia energética del panel solar.

Además, se integró el seguidor solar a Arduino Cloud, una plataforma IoT que permite monitorear en tiempo real todos los parámetros registrados del dispositivo, como los datos de las LDR y el sensor de voltaje. Esto posibilita el seguimiento y análisis del sistema desde cualquier parte del mundo.

Se diseñó la interfaz gráfica (GUI) utilizando Python 3 para interactuar con la plataforma Arduino Cloud a través de su API, con el fin de recopilar toda la información y presentarla de manera más cómoda y sencilla para el análisis del usuario.

XI. RECOMENDACIONES

Para el correcto funcionamiento del sistema de seguimiento solar, es esencial calibrar los sensores y actuadores, como los sensores LDR y los motores que ajustan la posición del panel. De no realizarse esta calibración, podrían ocurrir errores o fallas en el sistema, lo que eventualmente podría dejarlo fuera de servicio o dañar los componentes del circuito.

Es importante tener en cuenta que la estructura que soporta los paneles solares y los actuadores debe estar bien fijada al suelo o a la base. Cualquier problema imprevisto en el seguidor solar puede disminuir su eficiencia, e incluso interrumpir su funcionamiento, lo que podría degradar los motores al detenerse abruptamente en medio de la acción.

Se deben inspeccionar regularmente los componentes y su conexión con la plataforma IoT. Mantener el sistema sin obstrucción en los sensores o con desgaste en los motores mejorará su vida útil.

Realizar limpiezas periódicas en el panel solar, ya sea trimestral o mensualmente, dependiendo de las condiciones del entorno. El polvo y la suciedad pueden reducir el rendimiento del dispositivo, por lo que es importante mantenerlo limpio.

REFERENCIAS

- [1] J. da Rocha Queiroz, A. da Silva Souza, M. K. Gussoli, J. C. D. de Oliveira y C. M. G. Andrade, «Construction and automation of a microcontrolled solar tracker,» *Processes*, vol. 8, págs. 1-17, 10 oct. de 2020, ISSN: 22279717. DOI: 10.3390/pr8101309.
- [2] P Muthukumar, S Manikandan, R Muniraj, T Jarin y A. Sebi, «Energy efficient dual axis solar tracking system using IOT,» *Measurement: Sensors*, vol. 28, pág. 100 825, 2023, ISSN: 2665-9174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100825>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917423001617>.
- [3] J. M. Ruiz, I. M^a y O. Escribano, «IMPLANTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES Y ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL MUNICIPIO DE BLANCA (MURCIA) IMPLEMENTATION OF RENEWABLE ENERGY AND THE ESTIMATION OF CARBON FOOTPRINT IN THE MUNICIPALITY OF BLANCA (MURCIA),» págs. 121-135, 2012, ISSN: 0213-1781.
- [4] M. A. MOLAN, I. A. HAMAKHAN y S. J. M.SHAREEF, «EXERGETIC ANALYSIS OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC TRACKING SYSTEM IN ERBIL, IRAQ,» *The Journal of The University of Duhok*, vol. 20, págs. 281-393, 1 jul. de 2017, ISSN: 18127568. DOI: 10.26682/sjuod.2017.20.1.35. dirección: <http://journal.uod.ac/index.php/uodjournal/article/view/48>.
- [5] S. Gyamfi, B. Aboagye, M. Obeng y F. Peprah, *Criticality and severity of adverse effects of the sun on performance of solar PV systems*, ene. de 2024. DOI: 10.1016/j.seja.2024.100058.
- [6] L. Zou, L. Wang, J. Li, Y. Lu, W. Gong e Y. Niu, «Global surface solar radiation and photovoltaic power from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 climate models,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 224, págs. 304-324, jul. de 2019, ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.268.
- [7] A. E. Gürel, Ümit Ağbulut, H. Bakır, A. Ergün y G. Yıldız, *A state of art review on estimation of solar radiation with various models*, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e13167.
- [8] «Arduino based Dual Axis Solar Tracker,» Institute of Electrical y Electronics Engineers Inc., 2022, ISBN: 9781665400527. DOI: 10.1109/ICAIS53314.2022.9742876.
- [9] R. F. RUANO, «Trayectoria solar. Calculo,» *Ingeniería Energética General*, 2025.
- [10] Sunearth, *Calculo de la posición del sol*, 2025. dirección: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es.
- [11] M. Cuesta, J. Constante y D. Jijón, «Modelos de Predicción de Radiación Solar y Temperatura Ambiente mediante Redes Neuronales Recurrentes,» *Revista Técnica "energía"*, vol. 19, págs. 81-89, 2 ene. de 2023, ISSN: 1390-5074. DOI: 10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.552.
- [12] «Mapa solar del Ecuador 2019,»
- [13] O. R. Alomar, O. M. Ali, B. M. Ali, V. S. Qader y O. M. Ali, «Energy, exergy, economical and environmental analysis of photovoltaic solar panel for fixed, single and dual axis tracking systems: An experimental and theoretical study,» *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 51, pág. 103 635, 2023, ISSN: 2214-157X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103635>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23009413>.
- [14] S. Zele, A. Joshi, N. Gogate, D. Marathe y A. Shitole, «Experimental investigation on utilization of crushed solar panel waste as sand replacement in concrete,» *Solar Energy*, vol. 269, pág. 112 338, 2024, ISSN: 0038-092X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112338>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X2400032X>.
- [15] N. Jungbluth, *Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swissecoinvent database*, ago. de 2005. DOI: 10.1002/pip.614.
- [16] Metadata, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, 2023. dirección: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0038379>.
- [17] global solar atlas, *Potencial fotovoltaico en Ecuador*, 2023. dirección: <https://globalsolaratlas.info/download/ecuador>.
- [18] G. M. Garnacho Saucedo, R. Salido Vallejo y J. C. Moreno Giménez, «Efectos de la radiación solar y actualización en fotoprotección,» *Anales de Pediatría*, vol. 92, n.º 6, 377.e1-377.e9, 2020, ISSN: 1695-4033.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.04.014>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1695403320301661>.
- [19] . DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0212>.
- [20] T. Suheta, S. Muharom y M. Munir, «Analysis of Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Small-Scale Power Generation Systems Based On Microcontrollers,» *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2024, págs. 267-271, 2 2024, ISSN: 24499544. DOI: 10.15199/48.2024.02.54.
- [21] A. Peña-García y D. Gómez-Lorente, «Installation of solar panels in the surroundings of tunnel portals: A double-targeted strategy to decrease lighting requirements and consumption,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 97, mar. de 2020, ISSN: 08867798. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103251.
- [22] P. Mallitasig, R. Smit, S. Lopez y E. Alejandro, «Desarrollo de un seguidor solar para calibración de sensores de radiación en la empresa pública INAMHI orientado a IOT,» <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24451>, MARZO-18, 2023.
- [23] C. Naranjo y C. Paúl, «Diseño y simulación de un seguidor solar para mejorar el rendimiento de paneles solares portátiles,» 2024.
- [24] J. Fernando, C. Paredes, M. S. Diego, F Bustamante y V Ing, *Como requisito para la obtención del título de: INGENIERO AUTOMOTRIZ Quito, Agosto del 2023*, 2023.
- [25] Wited, *Coordenadas geográficas*, 2024. dirección: <https://www.wited.com/coordenadas-geograficas/>.
- [26] «Girasol, a sky imaging and global solar irradiance dataset,» *Data in Brief*, vol. 35, 2021, ISSN: 23523409. DOI: 10.1016/j.dib.2021.106914.
- [27] Repsol, *Seguidores solares: Qué son, tipos y ventajas*, 2023. dirección: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/seguidores-solares/index.cshtml>.
- [28] M. P. Solar, *Seguidor solar y los tipos que hay*, 2019. dirección: <https://mipanel solar.com/blog/seguidor-solar>.
- [29] WikiArq, *Arduino Cloud: ¿Qué es y cómo usarlo?* 2025. dirección: <https://wikiarq.top/arduino-cloud-que-es-y-como-usarlo/>.
- [30] Electromaker, *Arduino IoT Cloud with ESP32*, 2025. dirección: <https://www.electromaker.io/project/view/arduino-iot-cloud-with-esp32>.
- [31] Ángel Alejandro, R. Aya, J. Alejandro et al., *Análisis comparativo de plataformas IoT para el desarrollo de aplicaciones en ingeniería electrónica Comparative Analysis of IoT Platforms for Application Development in Electronic Engineering*, 2022. dirección: <https://orcid.org/0000-0002-4969-2402>.
- [32] dychen, *A Comparison of Arduino IoT Cloud to Amazon AWS, Google Cloud, and Microsoft Azure*, 2023. dirección: <https://community.element14.com/technologies/internet-of-things/b/blog/posts/a-comparison-of-arduino-iot-cloud-to-amazon-aws-google-cloud-and-microsoft-azure>.
- [33] C. Eléctricos, *ESP32: Especificaciones y diseños*, 2025. dirección: <https://www.circuitos-electricos.com/esp32-especificaciones-y-disenos/>.
- [34] D. Arduino, *LDR: Qué es, cómo funciona y aplicaciones*, 2025. dirección: <https://descubrearduino.com/ldr/>.
- [35] TecnoSalva, *¿Qué es y cómo funciona una LDR?* 2025. dirección: <https://www.tecnosalva.com/que-es-y-como-funciona-una-ldr/>.
- [36] I. GSL, *Sensor LDR*, 2022. dirección: <https://industriassgl.com/blogs/automatizacion/sensor-ldr>.
- [37] UElectronics, *Módulo sensor de voltaje 0-25V DC - Especificaciones y detalles*, 2025. dirección: <https://uelectronics.com/producto/modulo-sensor-de-voltaje-0-25v-dc/>.
- [38] BricoGeek, *Sensor medidor de Voltaje hasta 25V - FZ0430*, 2018. dirección: <https://tienda.bricogeek.com/sensores/1148-sensor-medidor-de-voltaje-hasta-25v-fz0430.html>.
- [39] C. A. Gordon, *FZ0430*, 2018. dirección: <https://es.scribd.com/document/371099359/Fz0430>.
- [40] E. THIDO, *FZ0430 Sensor De Voltaje 0-25VDC*, 2024. dirección: <https://www.electronicathido.com/detallesProducto.php?id=eGMxN1d2R2JjRmFsdEROL2diNVBIUT09>.
- [41] G. Factory, *Módulo Sensor de Voltaje 0 a 25V*, 2024. dirección: <https://www.geekfactory.mx/producto/modulo-sensor-de-voltaje-0-a-25-v/>.
- [42] P. Electrónica, *Puente H Driver L298N: Características y usos*, 2025. dirección: <https://pasionelectronica.com/puente-h-driver-l298n/>.

- [43] A. A. M. P. P. Wasi Hyder Larika, «View of DC Motor Speed Control Through Arduino and L298N Motor Driver Using PID Controller,» pág. 4, 2021. dirección: <http://www.ijeeet.com/index.php/ijeeet/article/view/94/76>.
- [44] N. Mechatronics, *Driver Puente H L298N 2A*, 2025. dirección: <https://naylampmechatronics.com/drivers/11-driver-puente-h-l298n.html>.
- [45] J. A. R. Morales, *Puente H driver L298N*, 2020. dirección: <https://pasionelectronica.com/puente-h-driver-l298n/>.
- [46] L. Llamas, *Controlar dos motores DC con Arduino y driver TB6612FNG*, 2015. dirección: <https://www.luisllamas.es/arduino-motor-dc-tb6612fng/>.
- [47] L. Llamas, *Controla motores de gran potencia con Arduino y BTS7960*, 2017. dirección: <https://www.luisllamas.es/controla-motores-de-gran-potencia-con-arduino-y-bts7960/>.
- [48] I. Guru, *JGY-370 DC Motor: Especificaciones y aplicaciones*, 2025. dirección: <https://innovatorsguru.com/jgy-370-dc-motor/>.
- [49] Compomax, *Motor DC con reducción metálica reversible JGY370 12V 6 RPM*, 2025. dirección: <https://www.compomax.com.br/es/produto/motor-dc-com-reducao-metalica-reversivel-jgy370-12v-6-rpm>.
- [50] R. Online, *Fuente de alimentación conmutada 1618297 - Especificaciones y detalles*, 2025. dirección: <https://es.rs-online.com/web/p/fuentes-de-alimentacion-conmutadas/1618297>.
- [51] A. I. LED, *Fuente conmutada Slim 150W 12V 12.5A — Fuente de alimentación 110 VAC - 220 VAC*, 2025. dirección: <https://amaterasuiluminacionled.com/products/fuente-conmutada-slim-150w-12v-12-5a-fuente-de-alimentacion-110-vac-220-vac>.
- [52] AutoSolar, *¿Qué es un controlador de carga solar?* 2025. dirección: <https://autosolar.co/aspectos-tecnicos/que-es-un-controlador-de-carga-solar>.
- [53] HiPowerCR, *Controladores de carga para energía solar*, 2025. dirección: <https://blog.hipowercr.com/controladores-de-carga-para-energia-solar>.
- [54] P. Solar, *¿Cómo funciona el regulador solar MPPT?* 2020. dirección: <https://www.prostarsolar.net/es/como-funciona-el-regulador-solar-mppt.html>.
- [55] C. Correa, *¿Qué regulador de carga solar elijo: PWM o MPPT?* 2022. dirección: <https://www.mpvsolarreference.com/post/qu%C3%A9-regulador-de-carga-solar-elijo-pwm-o-mppt>.
- [56] S. Tecnologías, *Explicación sobre los amperios en relación a las baterías*, 2025. dirección: <https://spitecnologias.com/explicacion-sobre-los-amperios-en-relacion-a-las-baterias/>.
- [57] K. E. R. R. Y. A. F. H. S. M. Ríos, *Aplicación de la logística inversa a las baterías de motos en Medellín*, 2015.
- [58] I. A. C. Díaz, «Vista de Baterías de iones de litio_estructura, funcionamiento, fallasysuscausas,» pág. 6, 2023.

XII. ANEXO A: CÓDIGO DE PYTHON PARA ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE SEGUIDOR SOLAR VS PANEL SOLAR FIJO

A continuación se presenta el código utilizado :

```
1
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import seaborn as sns
5 import numpy as np
6 from datetime import datetime
7 from matplotlib.gridspec import GridSpec
8 import matplotlib.dates as mdates
9 from scipy import stats
10
11 # Constantes del panel solar
12 CORRIENTE_NOMINAL = 0.938 # Amperios
13 POTENCIA_MAXIMA = 15 # Watts
14 VOLTAJE_NOMINAL = POTENCIA_MAXIMA / CORRIENTE_NOMINAL # Voltaje nominal calculado
15
16 def configurar_estilo_graficos():
17     """Configura el estilo general de los graficos"""
18     sns.set_style("whitegrid")
19     plt.rcParams['figure.figsize'] = (12, 8)
20     plt.rcParams['font.size'] = 10
21     plt.rcParams['axes.titlesize'] = 14
22     plt.rcParams['axes.labelsize'] = 12
23     plt.rcParams['axes.titleweight'] = 'bold'
24     plt.rcParams['axes.labelweight'] = 'bold'
25     plt.rcParams['font.family'] = 'sans-serif'
26
27 def load_and_prepare_data(file_path):
28     """Carga y prepara los datos con metricas adicionales"""
29     df = pd.read_excel(file_path)
30     df['datetime'] = pd.to_datetime(df['Fecha'] + ' ' + df['Hora'])
31     df['hour'] = df['datetime'].dt.hour
32     df['date'] = df['datetime'].dt.date
33
34     # Calcular metricas adicionales
35     df['diferencia_voltaje'] = df['VoltajeS'] - df['VoltajeF']
36     df['eficiencia_relativa'] = (df['VoltajeS'] / df['VoltajeF'] - 1) * 100
37
38     # Calculos de corriente y potencia basados en especificaciones reales
39     # Asumimos una relacion lineal entre voltaje y corriente
40     df['corriente_S'] = CORRIENTE_NOMINAL * (df['VoltajeS'] / VOLTAJE_NOMINAL)
41     df['corriente_F'] = CORRIENTE_NOMINAL * (df['VoltajeF'] / VOLTAJE_NOMINAL)
42
43     # Calculo de potencia real
44     df['potencia_S'] = df['VoltajeS'] * df['corriente_S']
45     df['potencia_F'] = df['VoltajeF'] * df['corriente_F']
46
47     # Limitar la potencia maxima a 15W
48     df['potencia_S'] = df['potencia_S'].clip(upper=POTENCIA_MAXIMA)
49     df['potencia_F'] = df['potencia_F'].clip(upper=POTENCIA_MAXIMA)
50
51     df['promedio_LDR'] = df[['LDR1', 'LDR2', 'LDR3', 'LDR4']].mean(axis=1)
52
53     return df
54
55 def plot_comparacion_avanzada(df):
56     """Grafico avanzado de comparacion de voltajes con analisis estadistico"""
57     fig = plt.figure(figsize=(15, 10))
58     gs = GridSpec(2, 2, figure=fig)
59
```

```

60 # Grafico principal de voltajes y corrientes
61 ax1 = fig.add_subplot(gs[0, :])
62
63 # Plotear voltajes en el eje primario
64 l1, = ax1.plot(df['datetime'], df['VoltajeS'],
65               label='Voltaje Seguidor',
66               color='#2ecc71',
67               linewidth=2)
68 l2, = ax1.plot(df['datetime'], df['VoltajeF'],
69               label='Voltaje Fijo',
70               color='#e74c3c',
71               linewidth=2)
72
73 # Configurar eje secundario para corrientes
74 ax1_twin = ax1.twinx()
75
76 # Plotear corrientes en el eje secundario
77 l3, = ax1_twin.plot(df['datetime'], df['corriente_S'],
78                   label='Corriente Seguidor',
79                   color='#2ecc71',
80                   linewidth=1.5,
81                   linestyle='--',
82                   alpha=0.7)
83 l4, = ax1_twin.plot(df['datetime'], df['corriente_F'],
84                   label='Corriente Fijo',
85                   color='#e74c3c',
86                   linewidth=1.5,
87                   linestyle='--',
88                   alpha=0.7)
89
90 # Ajustar limites y etiquetas
91 ax1.set_ylim(0, max(df['VoltajeS'].max(), df['VoltajeF'].max()) * 1.1)
92 ax1_twin.set_ylim(0, CORRIENTE_NOMINAL * 1.1)
93
94 # Configurar titulos y etiquetas
95 ax1.set_title('Análisis Comparativo de Voltajes y Corrientes', pad=20)
96 ax1.set_xlabel('Fecha y Hora')
97 ax1.set_ylabel('Voltaje (V)', color='black')
98 ax1_twin.set_ylabel('Corriente (A)', color='black')
99
100 # Ajustar formato de fecha en eje x
101 ax1.xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%m-%d %H'))
102 ax1.xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=6))
103 plt.setp(ax1.xaxis.get_majorticklabels(), rotation=45)
104
105 # Combinar leyendas de ambos ejes
106 lines = [l1, l2, l3, l4]
107 labels = [l.get_label() for l in lines]
108 ax1.legend(lines, labels, loc='upper right', bbox_to_anchor=(1, 1))
109
110 # Ajustar grilla
111 ax1.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
112
113 # Histograma de diferencias de potencia
114 ax2 = fig.add_subplot(gs[1, 0])
115 diferencia_potencia = df['potencia_S'] - df['potencia_F']
116 sns.histplot(data=diferencia_potencia, bins=30, color='#3498db', ax=ax2)
117 ax2.axvline(diferencia_potencia.mean(), color='red', linestyle='--',
118            label=f'Media: {diferencia_potencia.mean():.2f}W')
119 ax2.set_title('Distribucion de Diferencias de Potencia')
120 ax2.set_xlabel('Diferencia de Potencia (W)')
121 ax2.set_ylabel('Frecuencia')
122 ax2.legend()

```

```

123
124 # Boxplot de eficiencia por hora
125 ax3 = fig.add_subplot(gs[1, 1])
126 sns.boxplot(data=df, x='hour', y='eficiencia_relativa', ax=ax3, color='#9b59b6')
127 ax3.set_title('Distribucion de Eficiencia Relativa por Hora')
128 ax3.set_xlabel('Hora del Dia')
129 ax3.set_ylabel('Eficiencia Relativa (%)')
130
131 plt.tight_layout()
132 plt.savefig('comparacion_avanzada.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
133 plt.close()
134
135 def plot_analisis_eficiencia(df):
136     """Analisis detallado de eficiencia y potencia"""
137     fig = plt.figure(figsize=(15, 10))
138     gs = GridSpec(2, 2, figure=fig)
139
140     # Grafico de eficiencia relativa vs intensidad de luz
141     ax1 = fig.add_subplot(gs[0, :])
142     scatter = ax1.scatter(df['datetime'], df['eficiencia_relativa'],
143                          c=df['promedio_LDR'], cmap='viridis',
144                          alpha=0.6)
145     ax1.set_title('Eficiencia Relativa del Seguidor Solar')
146     ax1.set_xlabel('Fecha y Hora')
147     ax1.set_ylabel('Mejora en Eficiencia (%)')
148     plt.colorbar(scatter, ax=ax1, label='Intensidad de Luz (LDR promedio)')
149
150     # Grafico de correlacion LDR vs Potencia
151     ax2 = fig.add_subplot(gs[1, 0])
152     ax2.scatter(df['promedio_LDR'], df['potencia_S'],
153               alpha=0.5, color='#2ecc71', label='Seguidor')
154     ax2.scatter(df['promedio_LDR'], df['potencia_F'],
155               alpha=0.5, color='#e74c3c', label='Fijo')
156     ax2.set_title('Correlacion: Intensidad de Luz vs Potencia')
157     ax2.set_xlabel('Intensidad de Luz (LDR promedio)')
158     ax2.set_ylabel('Potencia (W)')
159     ax2.legend()
160
161     # Grafico de potencia comparativa
162     ax3 = fig.add_subplot(gs[1, 1])
163     ax3.plot(df['datetime'], df['potencia_S'].rolling(window=5).mean(),
164            label='Seguidor', color='#2ecc71')
165     ax3.plot(df['datetime'], df['potencia_F'].rolling(window=5).mean(),
166            label='Fijo', color='#e74c3c')
167     ax3.axhline(y=POTENCIA_MAXIMA, color='k', linestyle='--',
168               label=f'Potencia Maxima ({POTENCIA_MAXIMA}W)')
169     ax3.set_title('Comparacion de Potencia Generada (Media Movil)')
170     ax3.set_xlabel('Fecha y Hora')
171     ax3.set_ylabel('Potencia (W)')
172     ax3.legend()
173
174     plt.tight_layout()
175     plt.savefig('analisis_eficiencia.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
176     plt.close()
177
178 def plot_analisis_diario(df):
179     """Analisis del comportamiento diario"""
180     daily_stats = df.groupby('date').agg({
181         'VoltajeS': ['mean', 'max', 'min', 'std'],
182         'VoltajeF': ['mean', 'max', 'min', 'std'],
183         'corriente_S': ['mean', 'max', 'min'],
184         'corriente_F': ['mean', 'max', 'min'],
185         'potencia_S': ['mean', 'max', 'min', 'sum'],

```

```

186     'potencia_F': ['mean', 'max', 'min', 'sum'],
187     'eficiencia_relativa': ['mean', 'max', 'min']
188 }).round(2)
189
190 fig = plt.figure(figsize=(15, 12))
191 gs = GridSpec(3, 2, figure=fig)
192
193 # Grafico de potencia promedio diaria
194 ax1 = fig.add_subplot(gs[0, :])
195 x = np.arange(len(daily_stats.index))
196 width = 0.35
197 ax1.bar(x - width/2, daily_stats[('potencia_S', 'mean')],
198         width, label='Seguidor', color='#2ecc71')
199 ax1.bar(x + width/2, daily_stats[('potencia_F', 'mean')],
200         width, label='Fijo', color='#e74c3c')
201 ax1.set_title('Potencia Promedio Diaria')
202 ax1.set_xticks(x)
203 ax1.set_xticklabels([d.strftime('%Y-%m-%d') for d in daily_stats.index],
204                     rotation=45)
205 ax1.set_ylabel('Potencia (W)')
206 ax1.legend()
207
208 # Grafico de energia diaria acumulada
209 ax2 = fig.add_subplot(gs[1, :])
210 energy_S = daily_stats[('potencia_S', 'sum')] * 24/1000 # Convertir a kWh
211 energy_F = daily_stats[('potencia_F', 'sum')] * 24/1000
212 ax2.plot(daily_stats.index, energy_S.cumsum(),
213         label='Seguidor', color='#2ecc71', marker='o')
214 ax2.plot(daily_stats.index, energy_F.cumsum(),
215         label='Fijo', color='#e74c3c', marker='o')
216 ax2.set_title('Energia Acumulada Diaria')
217 ax2.set_xlabel('Fecha')
218 ax2.set_ylabel('Energia Acumulada (kWh)')
219 ax2.legend()
220
221 # Grafico de eficiencia diaria
222 ax3 = fig.add_subplot(gs[2, 0])
223 daily_stats[('eficiencia_relativa', 'mean')].plot(kind='bar',
224         color='#3498db', ax=ax3)
225 ax3.set_title('Eficiencia Relativa Diaria')
226 ax3.set_xlabel('Fecha')
227 ax3.set_ylabel('Eficiencia (%)')
228 ax3.tick_params(axis='x', rotation=45)
229
230 # Grafico de corriente maxima diaria
231 ax4 = fig.add_subplot(gs[2, 1])
232 ax4.plot(daily_stats.index, daily_stats[('corriente_S', 'max')],
233         label='Seguidor', color='#2ecc71', marker='o')
234 ax4.plot(daily_stats.index, daily_stats[('corriente_F', 'max')],
235         label='Fijo', color='#e74c3c', marker='o')
236 ax4.axhline(y=CORRIENTE_NOMINAL, color='k', linestyle='--',
237         label=f'Corriente Nominal ({CORRIENTE_NOMINAL}A)')
238 ax4.set_title('Corriente Maxima Diaria')
239 ax4.set_xlabel('Fecha')
240 ax4.set_ylabel('Corriente (A)')
241 ax4.legend()
242
243 plt.tight_layout()
244 plt.savefig(' analisis_diario.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
245 plt.close()
246
247 return daily_stats

```

XIII. ANEXO B: CÓDIGO DE MATLAB PARA ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE SEGUIDOR SOLAR VS PANEL SOLAR FIJO

A continuación se presenta el código utilizado :

```
1
2 % Script de analisis de seguimiento solar
3 % Limpieza del espacio de trabajo
4 clear all;
5 close all;
6 clc;
7
8 try
9     % Configuracion de estilo de graficos
10    set(0, 'DefaultFigurePosition', [100 100 1200 800]);
11    set(0, 'DefaultAxesFontSize', 10);
12    set(0, 'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1.4);
13    set(0, 'DefaultAxesLabelFontSizeMultiplier', 1.2);
14    set(0, 'DefaultAxesFontName', 'Arial');
15
16    % Cargar datos del Excel
17    fprintf('Cargando datos...\n');
18    filePath = 'datos_seguimiento_solar.xlsx';
19    data = readtable(filePath);
20
21    % Crear estructura de datos
22    df = struct();
23    df.datetime = datetime(data.Fecha + " " + data.Hora);
24    df.hour = hour(df.datetime);
25    df.date = dateshift(df.datetime, 'start', 'day');
26    df.VoltajeS = data.VoltajeS;
27    df.VoltajeF = data.VoltajeF;
28    df.LDR1 = data.LDR1;
29    df.LDR2 = data.LDR2;
30    df.LDR3 = data.LDR3;
31    df.LDR4 = data.LDR4;
32
33    % Calcular metricas adicionales
34    df.diferencia_voltaje = df.VoltajeS - df.VoltajeF;
35    df.eficiencia_relativa = (df.VoltajeS ./ df.VoltajeF - 1) * 100;
36    df.potencia_S = df.VoltajeS.^2 / 100;
37    df.potencia_F = df.VoltajeF.^2 / 100;
38    df.promedio_LDR = mean([df.LDR1, df.LDR2, df.LDR3, df.LDR4], 2);
39
40    % Grafico 1: Comparacion Avanzada
41    fprintf('Generando grafico de comparacion...\n');
42    figure('Position', [100 100 1500 1000]);
43
44    % Subplot 1: Grafico principal de voltajes
45    subplot(2,1,1);
46    plot(df.datetime, df.VoltajeS, 'Color', [0.18 0.8 0.44], 'LineWidth', 2);
47    hold on;
48    plot(df.datetime, df.VoltajeF, 'Color', [0.90 0.30 0.24], 'LineWidth', 2);
49    title('Analisis Comparativo de Voltajes');
50    xlabel('Fecha y Hora');
51    ylabel('Voltaje (V)');
52    legend('Seguidor', 'Fijo');
53    grid on;
54
55    % Subplot 2: Histograma de diferencias
56    subplot(2,2,3);
57    histogram(df.diferencia_voltaje, 30);
58    title('Distribucion de Diferencias de Voltaje');
59    xlabel('Diferencia de Voltaje (V)');
```

```

60 ylabel('Frecuencia');
61
62 % Subplot 3: Boxplot por hora
63 subplot(2,2,4);
64 boxplot(df.eficiencia_relativa, df.hour);
65 title('Distribucion de Eficiencia por Hora');
66 xlabel('Hora del Dia');
67 ylabel('Eficiencia Relativa (%)');
68
69 saveas(gcf, 'comparacion_avanzada.png');
70 close;
71
72 % Grafico 2: Analisis de Eficiencia
73 fprintf('Generando grafico de eficiencia...\n');
74 figure('Position', [100 100 1500 1000]);
75
76 % Subplot 1: Eficiencia relativa
77 subplot(2,1,1);
78 scatter(df.datetime, df.eficiencia_relativa, 36, df.promedio_LDR, 'filled');
79 colorbar;
80 title('Eficiencia Relativa del Seguidor Solar');
81 xlabel('Fecha y Hora');
82 ylabel('Mejora en Eficiencia (%)');
83
84 % Subplot 2: Potencia comparativa
85 subplot(2,1,2);
86 plot(df.datetime, movmean(df.potencia_S, 5), 'Color', [0.18 0.8 0.44]);
87 hold on;
88 plot(df.datetime, movmean(df.potencia_F, 5), 'Color', [0.90 0.30 0.24]);
89 title('Comparacion de Potencia Generada');
90 xlabel('Fecha y Hora');
91 ylabel('Potencia Estimada (W)');
92 legend('Seguidor', 'Fijo');
93
94 saveas(gcf, 'analisis_eficiencia.png');
95 close;
96
97 % Analisis Diario
98 fprintf('Generando analisis diario...\n');
99 uniqueDates = unique(df.date);
100 numDays = length(uniqueDates);
101
102 % Estructuras para estadisticas diarias
103 dailyStats = struct();
104 for i = 1:numDays
105     currDate = uniqueDates(i);
106     idx = df.date == currDate;
107
108     dailyStats.date(i) = currDate;
109     dailyStats.VoltajeS_mean(i) = mean(df.VoltajeS(idx));
110     dailyStats.VoltajeF_mean(i) = mean(df.VoltajeF(idx));
111     dailyStats.eficiencia_mean(i) = mean(df.eficiencia_relativa(idx));
112     dailyStats.potencia_S_sum(i) = sum(df.potencia_S(idx));
113     dailyStats.potencia_F_sum(i) = sum(df.potencia_F(idx));
114 end
115
116 % Grafico de analisis diario
117 figure('Position', [100 100 1500 1000]);
118 bar([dailyStats.VoltajeS_mean; dailyStats.VoltajeF_mean]);
119 title('Voltaje Promedio Diario');
120 xlabel('Dia');
121 ylabel('Voltaje (V)');
122 legend('Seguidor', 'Fijo');

```

```

123 saveas(gcf, ' analisis_diario.png');
124 close;
125
126 % Generar reporte estadístico
127 fprintf('Generando reporte estadístico...\n');
128 reporte = struct();
129 reporte.Mejora_Promedio = mean(df.eficiencia_relativa);
130 reporte.Mejora_Maxima = max(df.eficiencia_relativa);
131 reporte.Voltaje_Maximo_Seguidor = max(df.VoltajeS);
132 reporte.Voltaje_Maximo_Fijo = max(df.VoltajeF);
133 reporte.Energia_Total_Seguidor = sum(dailyStats.potencia_S_sum);
134 reporte.Energia_Total_Fijo = sum(dailyStats.potencia_F_sum);
135
136 % Redondear valores del reporte
137 fields = fieldnames(reporte);
138 for i = 1:length(fields)
139     reporte.(fields{i}) = round(reporte.(fields{i}), 2);
140 end
141
142 % Guardar resultados
143 writetable(struct2table(reporte), ' reporte_estadistico.csv');
144 dailyStats_table = struct2table(dailyStats);
145 writetable(dailyStats_table, 'estadisticas_diarias.csv');
146
147 % Mostrar resumen
148 fprintf('\nAnálisis completado exitosamente.\n');
149 fprintf('Se han generado los siguientes archivos:\n');
150 fprintf('1. comparacion_avanzada.png\n');
151 fprintf('2. analisis_eficiencia.png\n');
152 fprintf('3. analisis_diario.png\n');
153 fprintf('4. reporte_estadistico.csv\n');
154 fprintf('5. estadisticas_diarias.csv\n');
155
156 catch ME
157     fprintf('\nError durante la ejecución:\n%s\n', ME.message);
158 end

```

XIV. ANEXO C: DISEÑO DE SOPORTE DE SEGUIDOR SOLAR EN SOLIDWORKS 2024

A continuación se presenta :

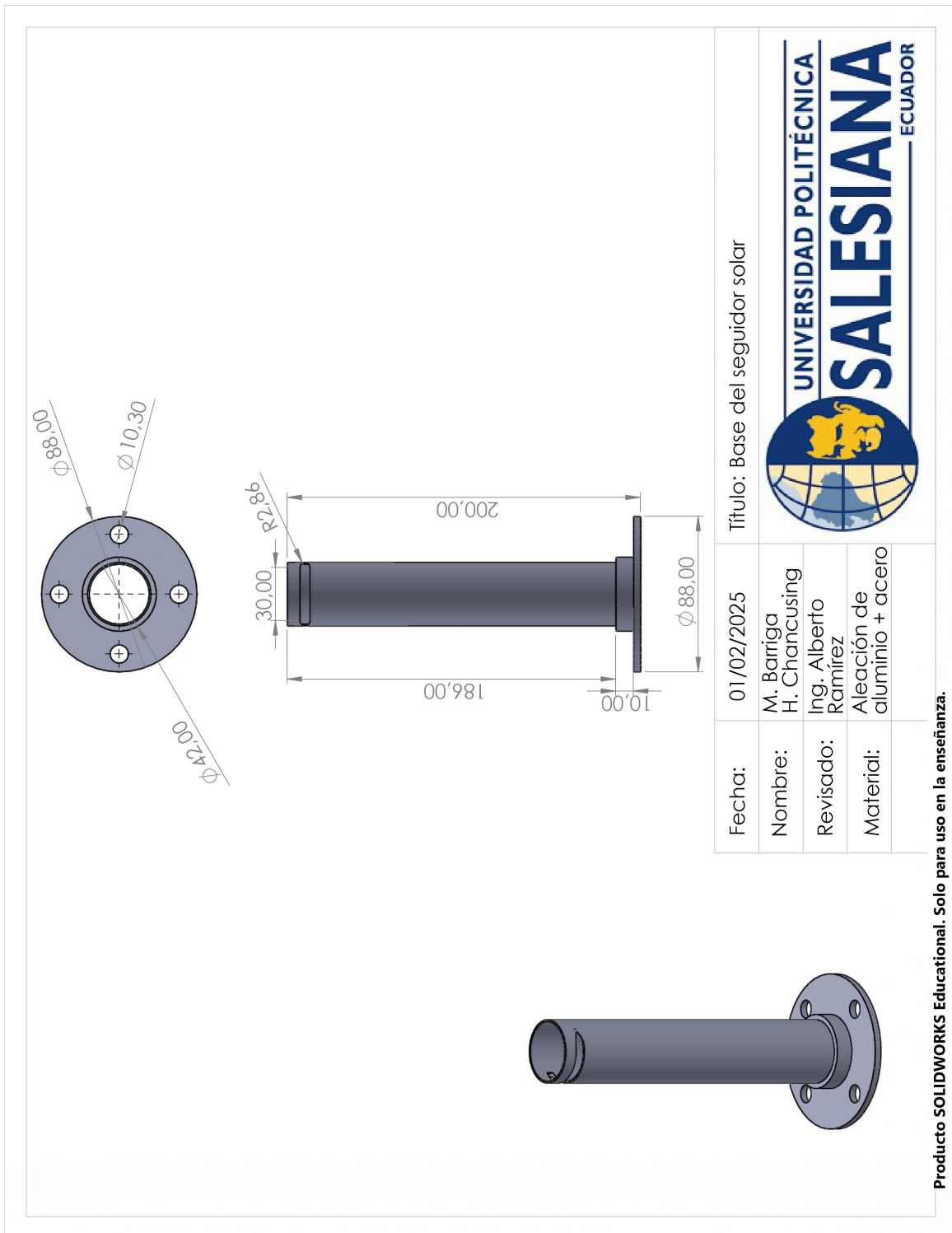
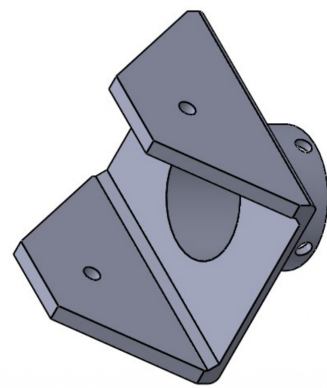
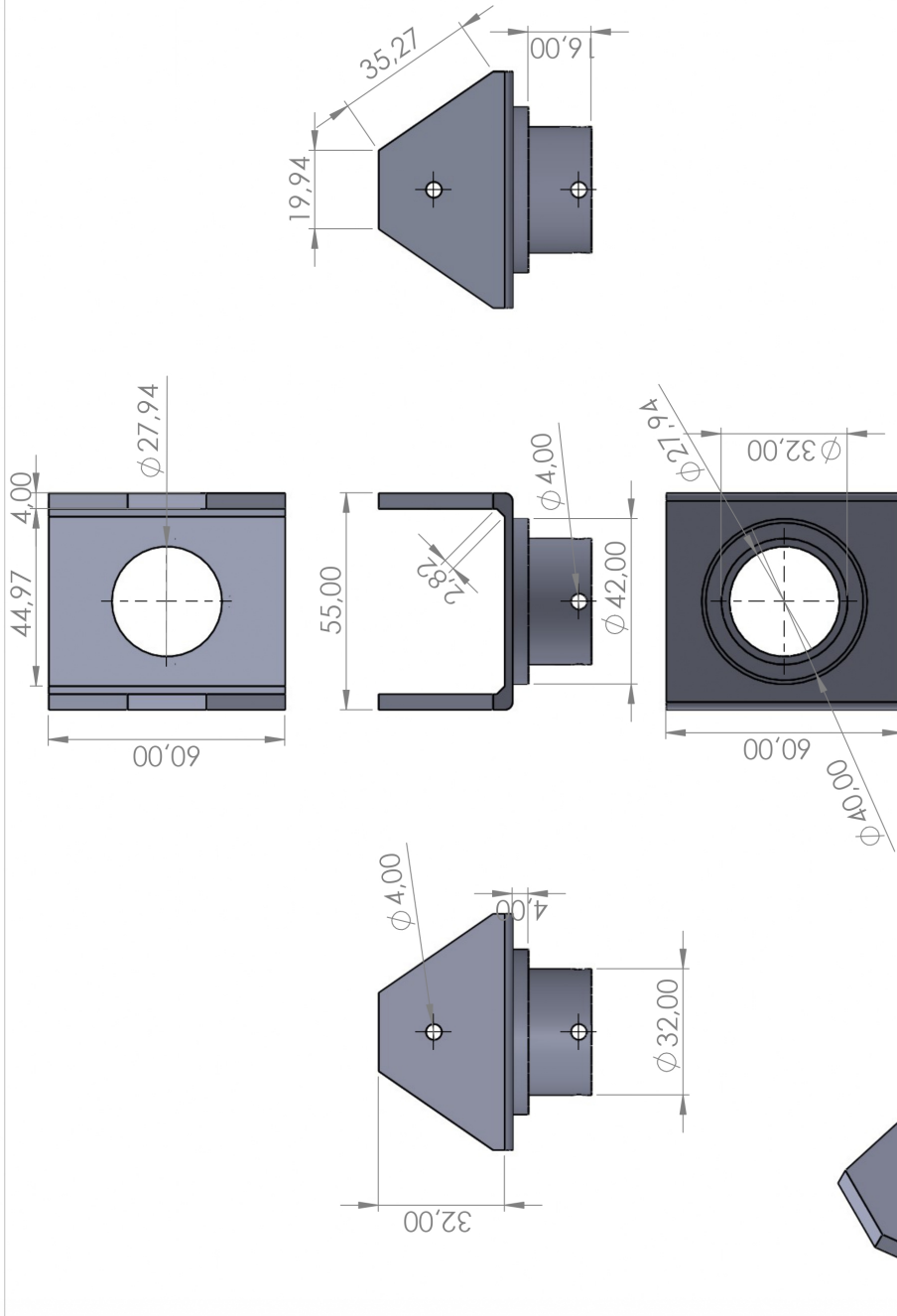


Figura 49: Base del seguidor solar. Fuente: Autores.



Fecha:	01/02/2025	Título: Soporte para base de motores
Nombre:	M. Barriga H. Chancusing	
Revisado:	Ing. Alberto Ramírez	
Material:	Aleación de aluminio + acero	

Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 50: Soporte para base de motores. Fuente: Autores.

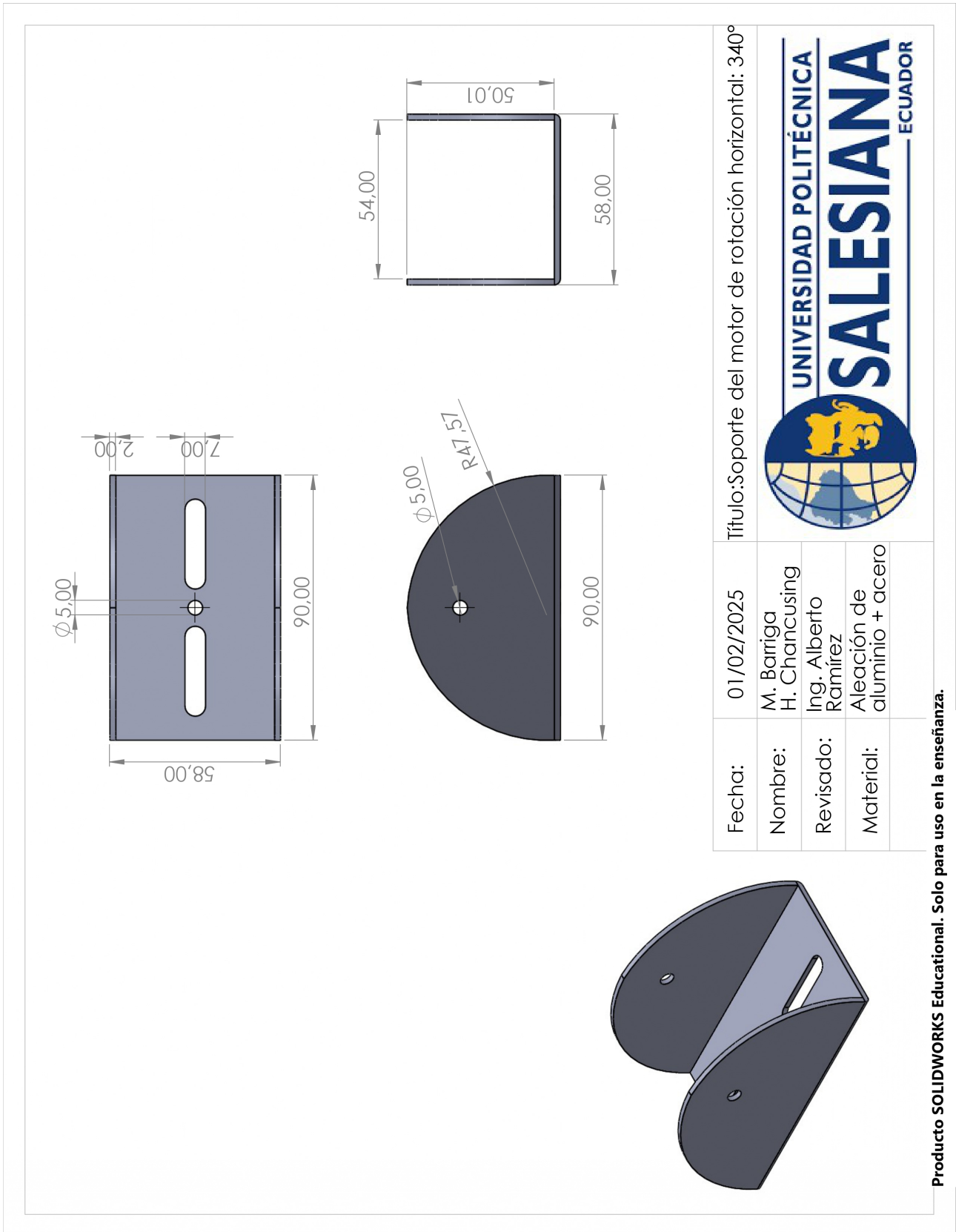
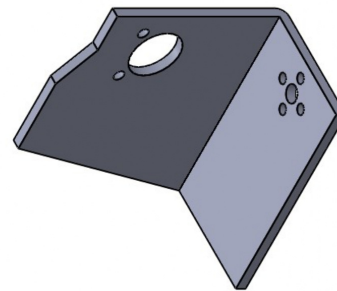
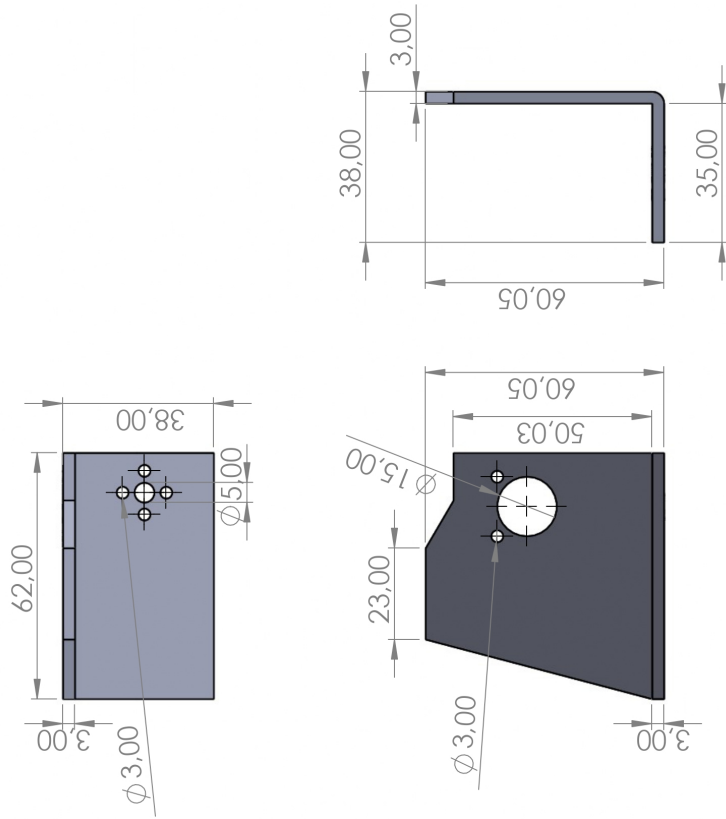


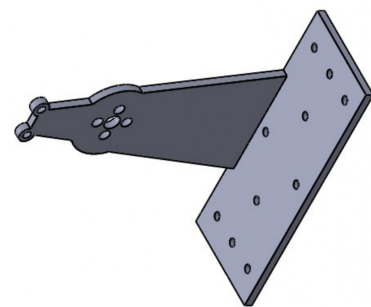
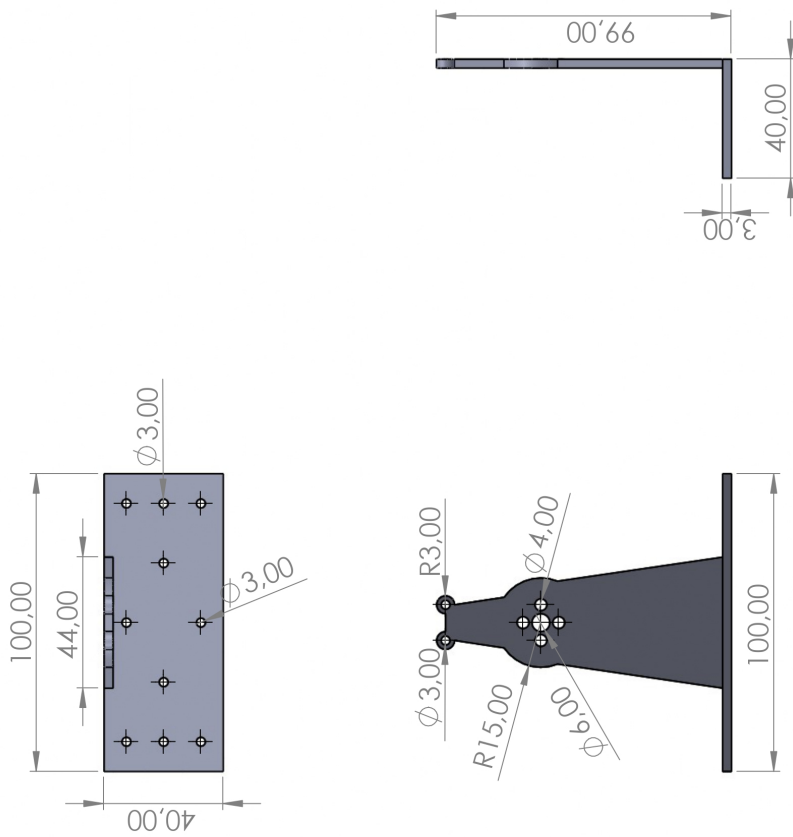
Figura 51: Soporte del motor de rotación horizontal 340 grados. Fuente: Autores.



Fecha:	01/02/2025	Título: Base del soporte para el motor vertical
Nombre:	M. Barriga H. Chancusing	
Revisado:	Ing. Alberto Ramírez	
Material:	Aleación de aluminio + acero	

Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.

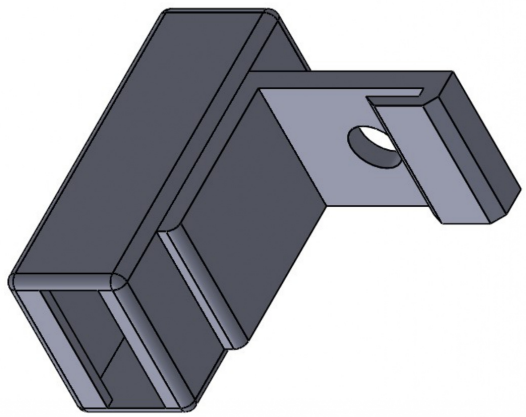
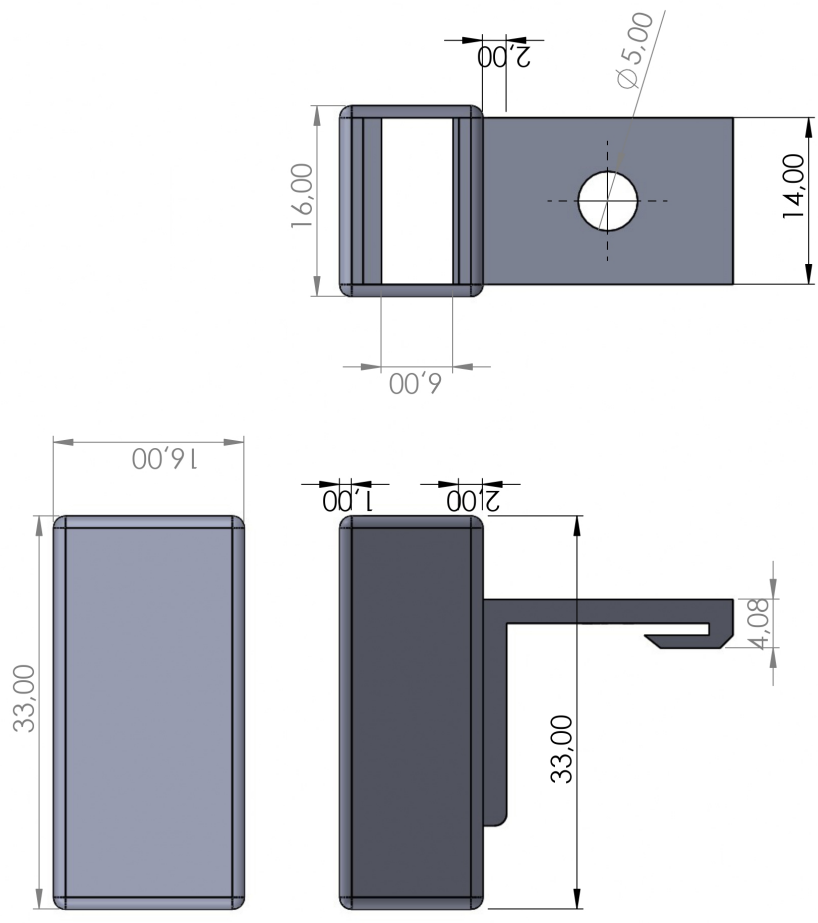
Figura 52: Base del soporte para el motor vertical. Fuente: Autores.



Fecha:	01/02/2025	Título: Soporte del motor de rotación vertical 120°
Nombre:	M. Barriga H. Chancusing	
Revisado:	Ing. Alberto Ramírez	
Material:	Aleación de aluminio + acero	

Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.

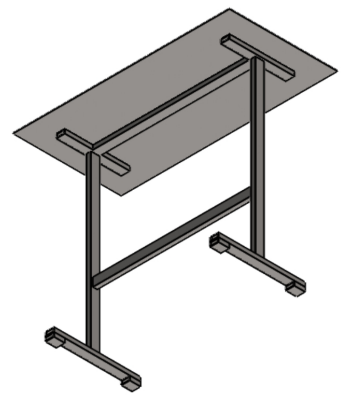
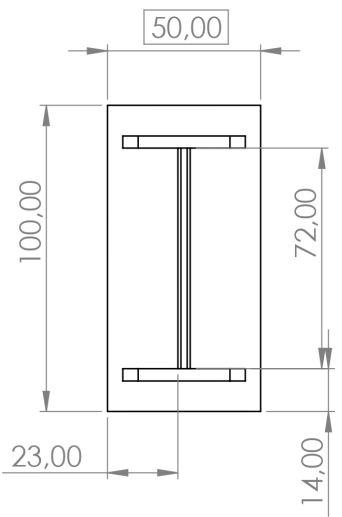
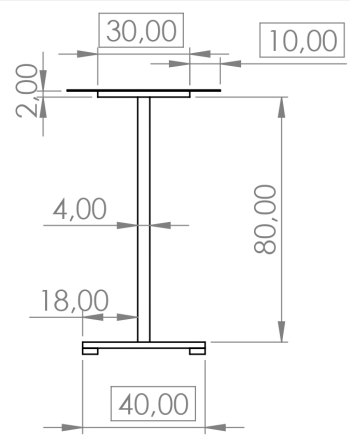
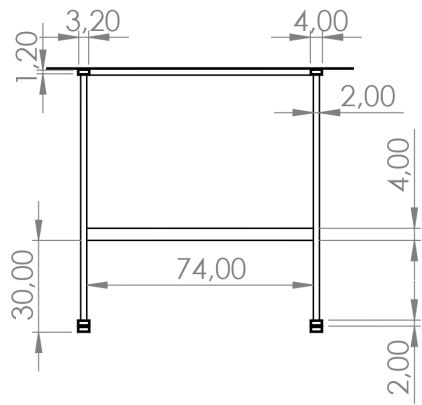
Figura 53: Soporte del motor de rotación vertical 120 grados. Fuente: Autores.


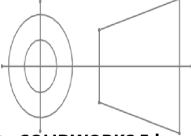


Fecha:	01/02/2025	Título: Base del soporte para el motor vertical
Nombre:	M. Barriga H. Chancusing	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
Revisado:	Ing. Alberto Ramírez	
Material:	Aleación de aluminio + acero	

Producto SOLIDWORKS Educativo. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 54: Pieza de encaje LDR. Fuente: Autores.



Fecha de realizacion:	28/12/24	Realizado por: Marlon Barriga Henry Chancusing	
Fecha de entrega:	14/01/25	Revisado por: Ing. Alberto Ramirez	
Escala:	1:1	Materia: Trabajo de titulación 2	
			Material: AISI 1020
			Masa: 36447.44 gramos

Mesa de apoyo

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Figura 55: Mesa de apoyo de los paneles. Fuente: Autores.

XV. ANEXO D: PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE SEGUIDOR SOLAR

A continuación se presenta :

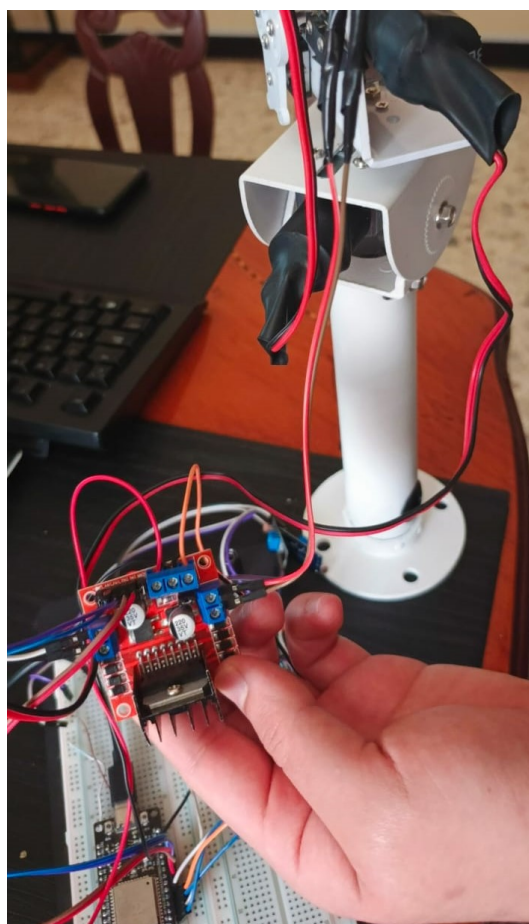


Figura 56: Conexiones de componentes. Fuente: Autores.

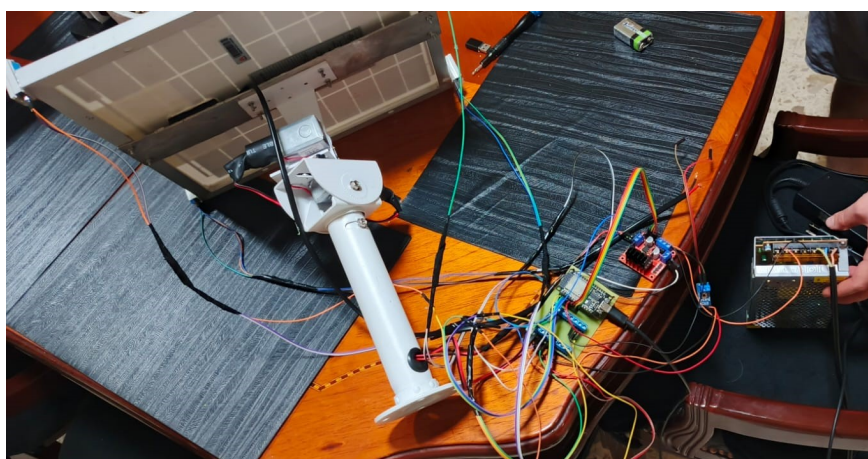


Figura 57: Pruebas de funcionamiento. Fuente: Autores.

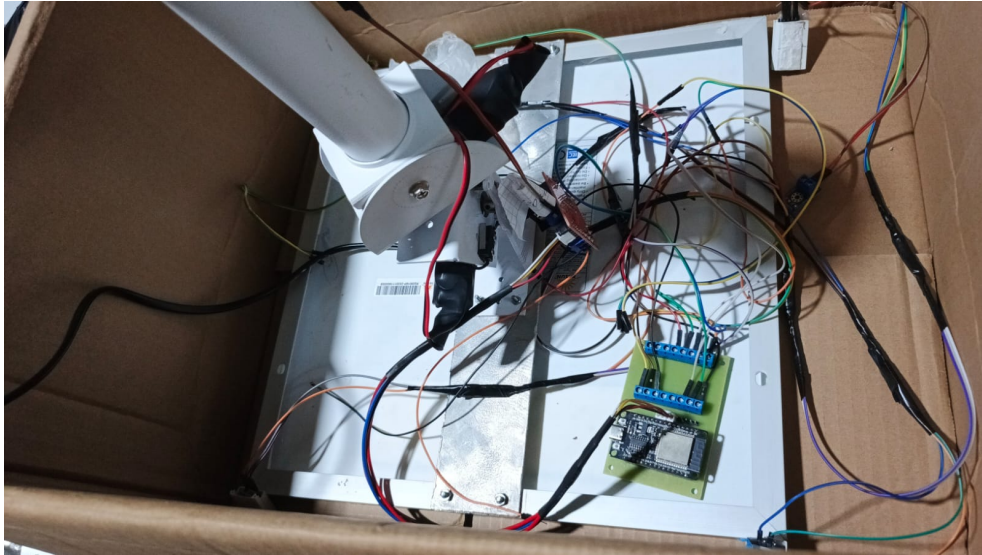


Figura 58: Cableado mal estructurado. Fuente: Autores.



Figura 59: Cableado de LDRS, ordenados y aislados. Fuente: Autores.

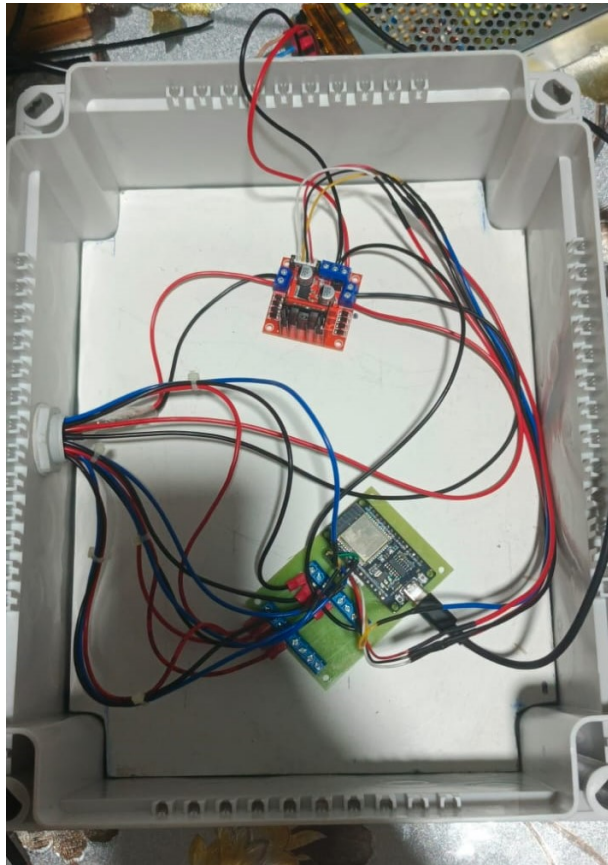


Figura 60: Distribución de cables en el interior de la caja. Fuente: Autores.



Figura 61: Cableado optimizado y correctamente acomodado en el interior de la caja. Fuente: Autores.



Figura 62: Instalación del seguidor solar sobre la mesa. Fuente: Autores.



Figura 63: Instalación del seguidor solar y panel fijo sobre la mesa de pruebas para recopilación de datos. Fuente: Autores.

XVII. ANEXO F: SOLDADO DE COMPONENTES DE LA PCB

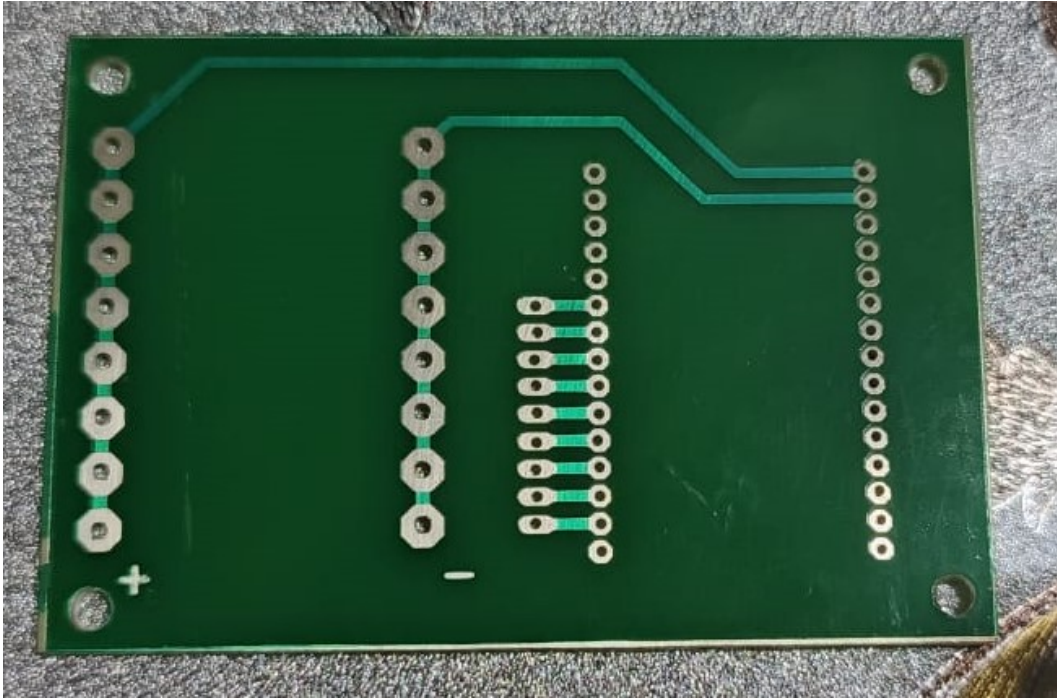


Figura 66: Pcb de fibra con antisolder. Fuente: Autores.

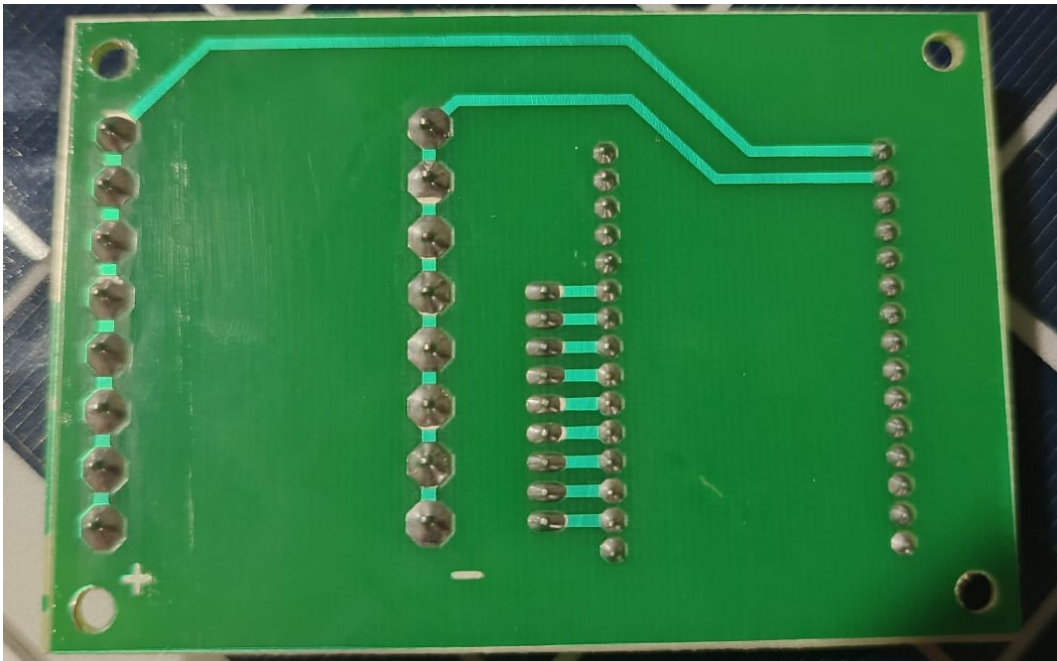


Figura 67: Soldado de pcb terminado. Fuente: Autores.

XVIII. ANEXO G: DISEÑO Y CIRCUITO DEL PANEL FIJO HECHO EN BAQUELITA PERFORADA

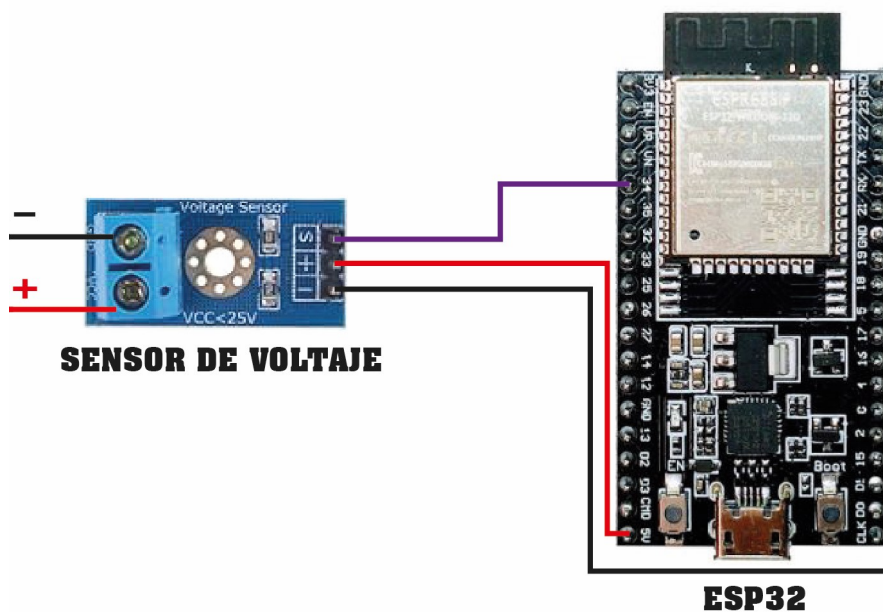


Figura 68: Diseño de conexiones del panel fijo. Fuente: Autores.

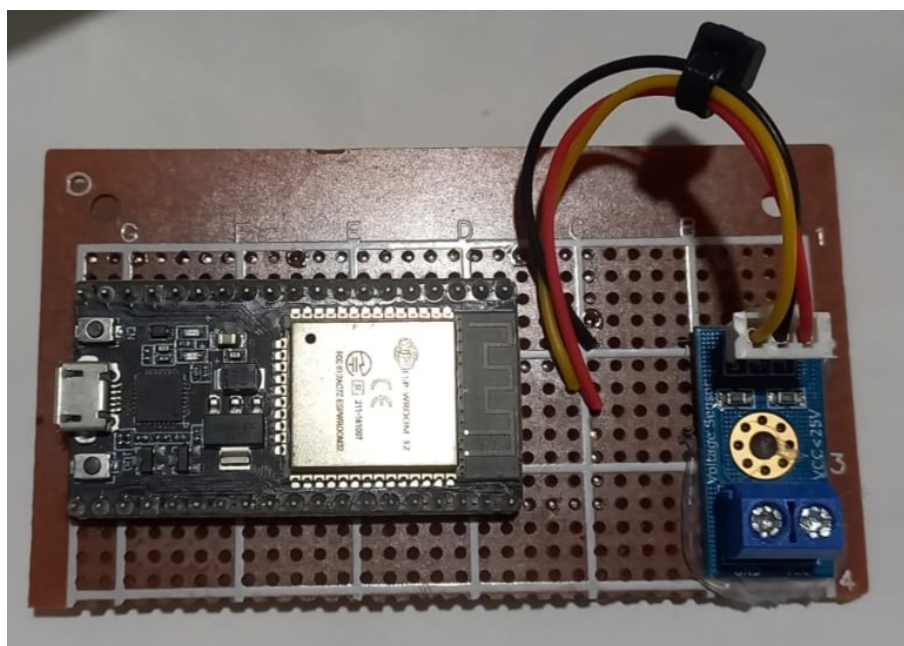


Figura 69: Componentes para el monitoreo del voltaje del panel fijo. Fuente: Autores.

XIX. ANEXO H: ESPECIFICACIONES DE MOTOR JGY-370

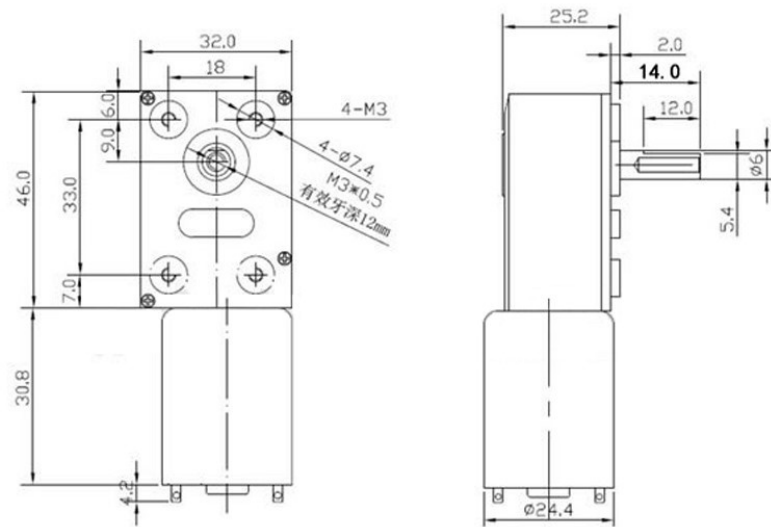


Figura 70: Dimensiones del motor [48].

Rated Voltage: 12V

Reduction ratio	37	65	150	200	250	324	600	972
No load current (mA)	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100	≤100
No load speed (rpm)	160	100	40	30	25	18	10	6
Rated torque (kg.cm)	0.8	1.5	3.4	4.5	5.6	7.3	13.0	22.0
Rated speed (rpm)	120	75	30	23	18	13	7	4.5
Rated current (A)	≤0.38	≤0.38	≤0.38	≤0.38	≤0.38	≤0.38	≤0.38	≤0.38
Stall torque (kg.cm)	2.9	4.8	11.0	15.0	18.0	23.0	25.0	25.0
Stall current (A)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3

Figura 71: Especificaciones del motor [48].