

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA DE PANEL FOTOVOLTAICO FIJO
RESPECTO A OTRO CON SEGUIDOR SOLAR”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Autores: Bach. Joel Carhuapoma Castillo
Bach. José Luis Cayatopa Mendoza**

Asesor: Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava

Línea de investigación: Eficiencia energética

JAÉN-PERÚ

2025

Joel Carhuapoma Castillo José Luis Cayatopa Men...

ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE PANEL FOTOVOLTAICO FIJO RESPECTO A OTRO CON SEGUI...

 Quick Submit Quick Submit Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3385180038

212 páginas

Fecha de entrega

24 oct 2025, 12:20 p.m. GMT-5

45.435 palabras

Fecha de descarga

24 oct 2025, 12:28 p.m. GMT-5

236.779 caracteres

Nombre del archivo

E_PANEL_FOTOVOLTAICO_FIJO_RESPECTO_A_OTRO_CON_SEGUIDOR_SOLAR.pdf

Tamaño del archivo

6.8 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN


Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
38 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
122 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 6 de noviembre del 2025, siendo las 16:00 horas, se reunieron de manera presencial los integrantes del Jurado:

Presidente: Mg. Jannier Alberto Montenegro Juárez

Secretario: Dr. Edwin Carlos Lenin Félix Poicon

Vocal: Mg. José Andrés Fernández Mera

Para evaluar la Sustentación del **Informe Final** de:

- ☐ Trabajo de Investigación
☒ **Tesis**
☐ Trabajo de Suficiencia Profesional

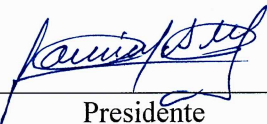
Titulado: **"Análisis comparativo de eficiencia energética de panel fotovoltaico fijo respecto a otro con seguidor solar"**, presentado por los Bachilleres Joel Carhuapoma Castillo y José Luis Cayatopa Mendoza, de la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén.

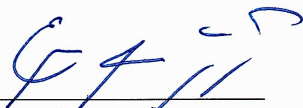
Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

☒ **Aprobar** ☐ Desaprobar ☒ **Unanimidad** ☐ Mayoría Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---|
| a) Excelente | 18,19,20 | ☐ |
| b) Muy bueno | 16, 17 | ☐ |
| c) Bueno | 14, 15 | ☒ (15) |
| d) Regular | 13 | ☐ |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | ☐ |

Siendo las 17:00 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.


Presidente


Secretario


Vocal

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, Joel Carhuapoma Castillo, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, identificado con DNI 73109161.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“Análisis Comparativo de Eficiencia Energética de Panel Fotovoltaico Fijo Respecto a Otro con Seguidor Solar”.

Asesorado por el Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava.

El mismo que presento bajo la modalidad de sustentación de Tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Mecánico Electricista.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 11 de Diciembre del 2025.



Joel Carhuapoma Castillo
DNI: 73109161

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, José Luis Cayatopa Mendoza, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, identificado con DNI 45527105.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“Análisis Comparativo de Eficiencia Energética de Panel Fotovoltaico Fijo Respecto a Otro con Seguidor Solar”.

Asesorado por el Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava.

El mismo que presento bajo la modalidad de sustentación de Tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Mecánico Electricista.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 11 de Diciembre del 2025.



José Luis Cayatopa Mendoza
DNI: 45527105

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	14
1.1.	Antecedentes.....	15
1.1.1	Antecedentes Internacionales	15
1.1.2.	Antecedentes Nacionales	16
1.1.3.	Antecedentes Regionales/ Locales	18
1.2.	Realidad Problemática	19
1.2.1.	Problema.....	19
1.2.2.	Formulación del Problema.....	20
1.3.	Justificación.....	20
1.3.1.	Justificación Social.....	20
1.3.2.	Justificación Ambiental	21
1.3.3.	Justificación Técnica.....	21
1.3.4.	Justificación Económica	21
1.4.	Objetivos.....	21
1.4.1.	Objetivo General.....	21
1.4.2.	Objetivos Específicos	21
II.	MATERIAL Y MÉTODOS.....	22
2.1.	Objeto de Estudio.....	22
2.2.	Ubicación del Área de Estudio.....	22
2.3.	Tipo y Diseño de la Investigación	23
2.3.1.	Tipo de Investigación	23
2.3.2.	Diseño de Investigación	24
2.4.	Población, Muestra y Muestreo	24
2.4.1.	Población.....	24
2.4.2.	Muestra	24

2.4.3.	Muestreo	25
2.5.	Metodología de Investigación.....	25
2.5.1.	Métodos.....	25
2.5.2.	Procedimientos	26
2.5.3.	Definición de Parámetros.	26
2.5.4.	Diseño de las Estructuras.	27
2.5.5.	Diseño Electrónico.	27
2.5.6.	Selección de Material Electrónico.	27
2.5.7.	Elaboración de las Estructuras.....	28
2.5.8.	Diseño e Impresión de los Circuitos en la Placa Electrónica de (PCB). 28	
2.5.9.	Conexión de los Materiales Electrónicos en los Circuitos de la Placa (PCB). 29	
2.5.10.	Implementación de la Plataforma ThingSpeak.....	29
2.5.11.	Adaptación de Librerías y Programación del Sistema.	29
2.5.12.	Implementación de Códigos para Funcionamiento del Sistema.....	29
2.5.13.	Medición de Parámetros.....	29
2.6.	Técnicas.....	30
2.7.	Registro y Análisis de Datos.	30
2.7.1.	Registro de Datos	30
2.7.2.	Análisis de Datos	30
2.8.	Materiales	31
2.8.1.	Panel Solar Monocristalino SY-30M.....	31
2.8.2.	Tarjeta Electrónica ESP32	32
2.8.3.	Sensor High Side INA219	32
2.8.4.	Motor Paso a Paso (Motor Pap Stepper Nema 17 - 1.7A 0.49N.m SL42STH48-16)	33

2.8.5.	Driver Pap DRV8825 1.5 A	34
2.8.6.	Módulo Max485 Conversor RS485 a Serial TTL	34
2.8.7.	Módulo RTC DS1307 + EEPROM AT24C32 (I2C)	35
2.8.8.	Convertidor Voltaje DC-DC STEP-DOWN 5A XL4005	35
2.8.9.	Módulo Lector de Memoria Micro SD Card 74LVC125A:	36
2.8.10.	Display Alfanumérico LCD 1602 - 5V azul:	36
2.8.11.	Módulo Adaptador LCD a I2C - PCF8574	37
2.8.12.	Conversor de Nivel Lógico 4CH 5V/3.3V	38
2.8.13.	Módulo Sensor LDR - 3 pin	38
2.8.14.	LED 5mm Difuso Blanco	38
2.8.15.	Batería CR2032	38
2.8.16.	Bornera KF301-2P	38
2.8.17.	Conector DC Bornera a Plug Jack DC H-M	38
2.8.18.	Cable Dupont	38
2.8.19.	Fuente de Alimentación	39
2.8.20.	Ferretería	39
2.8.21.	Chumacera	39
III.	RESULTADOS	39
3.1.	O.E.1: Recopilación de Información del Recurso Energético Disponible y Selección de Paneles Fotovoltaicos	39
3.1.1.	Datos meteorológicos diarios en la Universidad Nacional de Jaén ..	40
3.1.2.	Hora Solar Pico (HSP) en Jaén	42
3.1.3.	Velocidad del Viento	43
3.1.4.	Cobertura Nubosa	44
3.1.5.	Selección de los Paneles Fotovoltaicos	45
3.2.	O.E.2: Diseño Electrónico, Estructural de los Soportes y Programación del Seguidor Solar	45

3.2.1.	Diseño de las Estructuras de soporte para los paneles	45
3.2.2.	Diseño de los Circuitos Electrónicos.....	46
3.2.3.	Adquisición de Materiales Electrónicos.....	48
3.2.4.	Diseño e Impresión de los Circuitos en la Placa PCB. (Printed Circuit Board)	48
3.2.5.	Implementación de los Circuitos con Materiales Electrónicos	50
3.2.6.	Programación y Adaptación del Código SPA (Solar Position Algorithm)	51
3.2.7.	Implementación del Programa Para Almacenamiento de Datos de Medición	52
3.3.	OE3. Manufactura de los Paneles Fotovoltaicos.....	52
3.3.1.	Estructura del Sistema con Seguidor Solar	53
3.3.2.	Mecanismo del Movimiento de Acimut.....	55
3.3.3.	Mecanismo del Movimiento de Elevación.....	56
3.3.4.	Estructura para el Sistema Fijo.....	57
3.3.5.	Ubicación de los Sistemas Fotovoltaicos	57
3.3.6.	Inclinación y Orientación del Sistema Fotovoltaico Fijo.....	58
3.3.7.	Instalación del Sistema Fotovoltaico con Seguidor Solar	59
3.4.	OE4: Medición y Evaluación de parámetros eléctricos obtenidos para determinar la eficiencia energética de cada panel fotovoltaico.....	62
3.4.1.	Generación Energética de los Paneles Fotovoltaicos	62
3.4.2.	Relación de Radiación y Eficiencia Energética de los Sistemas Pss y Psf	65
3.4.3.	Comportamiento de la Temperatura Interna en las Celdas del Panel Solar Monocristalino 30W SY-30M.....	66
3.4.4.	Días con Mayor Diferencia Porcentual de la Comparación Energética.	69

3.4.5.	Días con Menor Diferencia Porcentual de la Comparación Energética.	71
3.4.6.	Valor más Bajo de Potencia Eléctrica Producida en los 25 Días del Periodo de Pruebas.	72
3.4.7.	Valor más Alto de Potencia Eléctrica Producida en los 25 Días del Periodo de Pruebas.	73
3.4.8.	Margen de Error del Sistema Fotovoltaico con Seguidor Solar (Pss).	74
3.4.9.	Margen de Error del Sistema Fotovoltaico Fijo (Psf).....	76
3.4.10.	Relación de Margen de Error de los Sistemas Pss y Psf.....	77
IV.	DISCUSIÓN	78
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
5.1.	CONCLUSIONES.....	85
5.2.	RECOMENDACIONES.....	86
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
VII.	ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación geográfica de la Universidad Nacional de Jaén	23
Figura 2 Procedimiento que se llevó en la investigación	26
Figura 3 Diagrama del sistema electrónico y sus funciones	28
Figura 4 Panel fotovoltaico monocristalino SY.30M	31
Figura 5 Microcontrolador ESP 32	32
Figura 6 Sensor de voltaje y corriente INA219	33
Figura 7 Motor Stepper Nema 17	33
Figura 8 Driver PAP DRV 8825	34
Figura 9 Reloj RTC DS1307	35
Figura 10 Convertidor Voltaje DC-DC Step-Down 5A XL4005	35
Figura 11 Lector de memoria Micro SD Card 74lvc125A	36
Figura 12 Pantalla LCD 1602 - 5V Azul	37
Figura 13 Adaptador LCD a I2C PCF8574	37
Figura 14 Fuente de alimentación DC 12V	39
Figura 15 Gráfico de radiación, temperatura máxima, mínima y media durante los días de medición.....	42
Figura 16 Velocidad del viento, 2025.....	43
Figura 17 Presencia de nubosidad	44
Figura 18 Estructuras y paneles fotovoltaicos diseñados en CAD SolidWorks ...	46
Figura 19 Circuito principal elaborado en software Fritzing.....	47
Figura 20 Circuito secundario elaborado en software Fritzing.....	47
Figura 21 Impresión de los circuitos en la placa PCB	49
Figura 22 Placa de los circuitos	49

Figura 23 Implementación de los circuitos con materiales electrónicos	51
Figura 24 Construcción de la estructura del sistema con seguidor solar.....	53
Figura 25 Base de la estructura del sistema con seguidor solar	54
Figura 26 Estructura y panel fotovoltaicos del mecanismo con seguidor solar ...	55
Figura 27 Mecanismo de movimiento acimut para la estructura con seguidor solar	56
Figura 28 Mecanismo de movimiento de elevación, estructura con seguidor solar	57
Figura 29 Estructura del sistema fotovoltaico fijo.....	57
Figura 30 Ubicación de los sistemas fotovoltaicos	58
Figura 31 Instalación y orientación del sistema fotovoltaico fijo	59
Figura 32 Instalación del sistema fotovoltaico con seguidor solar	62
Figura 33 Promedio de potencia diaria del sistema Pss y Ps	64
Figura 34 Línea de tendencia de la energía generada (W) de los sistemas Pss y Psf	64
Figura 35 Relación Radiación/eficiencia energética de los sistemas Pss y Psf	66
Figura 36 Promedio de potencia de los sistemas Pss y Psf del día 19/05/2025.....	70
Figura 37 Promedio de potencia de los sistemas Pss y Psf del día 17/05/2025.....	71
Figura 38 Grafica de la potencia por hora del día con la menor producción energética	73
Figura 39 Grafica de la potencia por hora del día con mayor producción energética	74
Figura 40 Potencia por hora y margen de error del periodo de prueba de los 25 días del Pss	76
Figura 41 Potencia por hora y variación estándar de los 25 días medidos.....	77

Figura 42 Relación de potencia y margen de error de los sistemas Pss y Psf.....	78
Figura 43 Grafica de dispersión de radiación y potencia de Pss	79
Figura 44 Grafica de dispersión de radiación y potencia de Psf	79
Figura 45 Diagrama de Circuito Electrónico Principal (Emisor)	207
Figura 46 Diagrama de Circuito Electrónico Secundario (Receptor).....	208
Figura 47 Placas electrónicas	208
Figura 48 Primer diseño en CAD SolidWorks	209
Figura 49 Construcción y Montaje del Panel Fotovoltaico a la Estructura Fija	209
Figura 50 Construcción de la Estructura con Seguidor Solar	210
Figura 51 Placas electrónicas en PCB.....	210
Figura 52 Programación e Instalación de Componentes Electrónicos	211
Figura 53 Primeras Pruebas en Lugar de Medición.....	212
Figura 54 Inspección del lugar para instalación de los paneles solares Pss y Psf	
.....	213
Figura 55 Instalación Final y Pruebas de Funcionamiento	213

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos meteorológicos diarios en la Universidad Nacional de Jaén.....	40
Tabla 2 Hora solar pico máximo y mínimo.....	42
Tabla 3 Posición angular de salida y puesta del sol	60
Tabla 4 Potencia diaria de los sistemas fotovoltaicos Pss y Psf.....	63
Tabla 5 Especificaciones Técnicas y dimensiones	67
Tabla 6 Potencia por hora y variación estándar de los 25 días medidos.....	75

Tabla 7 Potencia por hora y margen de error del periodo de prueba de los 25 días del Psf	76
Tabla 8 Promedio por hora de los 25 días de recolección de datos.....	188
Tabla 9 Tabla de potencia, radiación y temperatura	206

ANEXOS

Anexo 1 Plano del el fotovoltaico SY-30M y motor nema 17	95
Anexo 2 Planos de estructura fija.....	97
Anexo 3 Planos de la estructura con seguidor solar	98
Anexo 4 Librería de posición solar (SPA.h Y SPA.C)	112
Anexo 5 Código del seguidor solar	148
Anexo 6 Códigos complementarios.....	181
Anexo 7 Base de datos recolectados.....	188
Anexo 8 Potencia, Radiación y Temperatura Diaria	206
Anexo 9 Diagramas y Placas	207
Anexo 10 Sección fotográfica	209

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo fundamental analizar comparativamente la eficiencia en la generación de energía entre paneles fotovoltaicos que utilizan un panel solar fijo y otro con seguimiento solar, instalados en una misma ubicación geográfica con especificaciones técnicas iguales, para el sistema con seguidor solar no se usaron sensores LDR, sino que se utilizó un algoritmo desarrollado para calcular con alta precisión la posición del sol en el cielo en función de la fecha, hora y ubicación geográfica sobre cualquier punto de la Tierra, llamado Solar Position Algorithm (SPA), este algoritmo contiene una alta precisión con un margen de error de ± 0.0003 . La investigación es cuantitativa, tipo aplicada, utilizó un diseño descriptivo comparativo. La muestra estuvo conformada por los parámetros eléctricos asociados con la generación de energía de cada panel. La recolección de datos se llevó a cabo durante 25 días, por un sistema automatizado de una tarjeta de desarrollo ESP32 a intervalos de 30 segundos. Los resultados encontrados indican que la producción energética por el sistema con seguidor solar fue 7.6475 W mientras que el sistema fijo fue 6.2816 W, es decir, el sistema con seguimiento solar logró ser más eficiente que el sistema fotovoltaico fijo en un 21.74 %, las condiciones climáticas de Jaén - caracterizadas por una elevada disponibilidad de irradiancia supera los 2,3 kWh/m²/día de irradiación solar directa y una baja nubosidad matinal favorecen el uso de seguidores solares.

Palabras clave: eficiencia energética, paneles fotovoltaicos, generación de energía, panel con seguidor solar (Pss), panel sistema fijo (Psf).

ABSTRACT

The fundamental objective of this research was to comparatively analyze the efficiency in energy generation between photovoltaic panels that use a fixed solar panel and another with solar tracking, installed in the same geographical location with similar technical specifications. For the system with solar tracker, LDR sensors were not used; instead, an algorithm developed to calculate the position of the sun in the sky with high precision based on the date, time, and geographical location over any point on Earth, called the Solar Position Algorithm (SPA), was used. This algorithm contains high precision with a margin of error of ± 0.0003 . The research is quantitative, applied type, and used a comparative descriptive design. The sample consisted of the electrical parameters associated with the energy generation of each panel. Data collection was carried out over 25 days by an automated system using an ESP32 development board at 30-second intervals. The results found indicate that the energy production by the system with solar tracker was 7.6475 W while the fixed system was 6.2816 W, meaning that the solar tracking system achieved 21.74% higher efficiency than the fixed photovoltaic system. The climatic conditions of Jaén—characterized by high availability of irradiance exceeding 2.3 kWh/m²/day of direct solar irradiation and low morning cloud cover—favor the use of solar trackers.

Keywords: energy efficiency, photovoltaic panels, energy generation, panel with solar tracker (Pss), fixed system panel (Psf).

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de transición energética y creciente preocupación por el cambio climático, el uso de fuentes renovables de energía se ha convertido en una prioridad global. Entre estas fuentes, la energía solar fotovoltaica destaca por su abundancia, accesibilidad y bajo impacto ambiental. Ahora bien, para el máximo aprovechamiento de los sistemas fotovoltaicos es fundamental evaluar las distintas condiciones a partir de las que se puede determinar su eficiencia. En este marco, el presente trabajo se orienta hacia el análisis de la eficiencia energética de dos configuraciones de *paneles* fotovoltaicos, el panel fijo y el panel con seguidor solar.

Si el panel fotovoltaico fijo, por su diseño estático, presenta ciertas ventajas en cuanto menor coste y mantenimiento; El rendimiento del sistema depende, en cambio, del ángulo de incidencia solar, el cual varía a lo largo del día y del año. En el panel fotovoltaico con seguidor solar, este permite seguir el movimiento aparente del sol y promete mayor captación de radiación solar y de este modo un incremento de la producción energética. Este análisis no sólo persigue conocer cuál de los dos sistemas es más eficiente energéticamente, sino que también pretende entender en qué condiciones y contextos geográficos serán oportunos emplear uno u otro. Para tal propósito se tiene en cuenta la irradiación solar, la inclinación y ubicación del proyecto. La comparación se realiza sobre una base de datos experimentales y simulaciones como forma de determinar el rendimiento de ambos *paneles fotovoltaicos* en un periodo determinado, lo que demostrara porque el *panel* con seguidor solar es más eficiente en cuanto a la captación de energética. La planta solar Rubí, la más grande del Perú actualmente, usa un sistema de seguidor solar de un solo eje (elevación), con la finalidad de optimizar la captación solar, esta investigación usa un sistema básico que corroborara que es necesario optar por sistemas con seguidores solares en futuros proyectos.

El propósito primordial de este trabajo es proporcionar información técnica exhaustiva y relevante en relación con proyectos dirigidos a plantas solares. Esto abarca la optimización del aprovechamiento eficiente de los recursos solares disponibles, al tiempo que se promueve un enfoque más sólido hacia la sostenibilidad energética en su totalidad.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes Internacionales

Pazmiño et al. (2024) llevaron a cabo un estudio centrado en un análisis comparativo para evaluar la producción de energía recuperable de paneles solares estáticos en comparación con aquellos que cuentan con sistemas de seguimiento unidimensional. En el estudio, se han diseñado y fabricado tres módulos solares que comparten especificaciones técnicas idénticas, con la única diferencia en sus sistemas de seguimiento solar. Se han implementado sistemas de seguimiento de un solo eje, los cuales han sido programados de acuerdo con datos astronómicos y dotados de un sistema de seguimiento de la luz mediante sensores de resistencia dependiente de la luz (LDR). Se implementaron sensores y software con el fin de analizar la producción en cada uno de los prototipos. La placa Arduino Mega, junto con un módulo Ethernet, es responsable de la gestión y control de datos para la visualización automatizada de las curvas de producción mediante un portal web. El hallazgo primordial de este estudio indica que el sistema fotovoltaico que incorpora programación astronómica es el más ventajoso debido a su eficiente consumo energético a través de ajustes de la posición de los paneles. La significancia del estudio y su conexión con la presente investigación reside en la comparación del rendimiento energético producido por paneles solares estáticos en relación con aquellos que incorporan un sistema de seguimiento diseñado para optimizar su eficiencia energética.

Biedma (2022) examinó cómo las condiciones invernales y estivales afectan la producción de electricidad de paneles solares fijos y móviles. El estudio implicó realizar un análisis estadístico de la energía generada por paneles solares instalados en una residencia urbana. Es importante señalar que un panel solar tiene una orientación fija, mientras que el otro es ajustado por un motor que sigue al sol todo el día. Se examinaron las orientaciones óptimas para los paneles solares, así como la orientación más eficiente para el panel fijo, teniendo en cuenta ambas variables en función de las coordenadas geográficas del área de investigación. Se analizaron y evaluaron las sombras proyectadas sobre los paneles con el propósito de calcular las pérdidas generadas por esta interferencia. Los resultados del estudio sugieren que implementar un sistema de paneles solares móviles en un entorno residencial es más beneficioso que utilizar un panel fijo, ya que produce un aumento del 14% en la eficiencia de la producción de energía. Sin embargo, existen numerosos factores a tener en cuenta al elegir entre un sistema u otro. El estudio está en línea con la investigación que se ha realizado, dado que tiene como propósito evaluar la eficiencia energética de un panel solar de orientación fija

mediante un análisis comparativo con un panel de seguimiento solar, y también porque hay similitud en el proceso de la recolección de datos que facilitarán una comparación histórica y en tiempo real, permitiendo calcular la potencia (W) generada por cada panel en distintos momentos del día.

Rojas (2020) llevó a cabo una investigación sobre la optimización del rendimiento de sistemas fotovoltaicos mediante la implementación de un prototipo de seguimiento solar conocido como MSCOSA (mecanismo de seguidor con cuerdas para la orientación solar automática), con el objetivo de simular e instalar generadores fotovoltaicos y un sistema de seguimiento solar automatizado. El proyecto emplea el MSCOSA porque presenta un menor peso en comparación con los actuales seguidores solares. La estrategia consiste en emplear un índice de desempeño fundamentado en vectores opuestos. El sistema MSCOSA y otro sistema de seguimiento solar exhibieron un rendimiento comparable en pruebas de campo, con un nivel de confianza del 95%, lo cual es consistente con los datos experimentales. La investigación aborda la optimización del rendimiento del sistema fotovoltaico mediante el desarrollo e implementación de un prototipo de seguimiento solar. El estudio realizado está vinculado con esta investigación dado que contribuye a la optimización del rendimiento del sistema fotovoltaico mediante el desarrollo y la implementación del prototipo de un sistema de seguimiento automático de la secuencia de alineación solar, denominado MSCOSA.

1.1.2. Antecedentes Nacionales

Chero y Tesén (2021) evaluaron la eficiencia de las instalaciones de paneles solares. El objetivo del estudio fue desarrollar un sistema de posicionamiento automático que permita la optimización de la orientación de los paneles solares, empleando un enfoque fundamentado en la lógica difusa, con el fin de maximizar la captación de energía solar almacenada. La investigación indica que la configuración del sistema mecánico se compone de una estructura metálica que optimiza el establecimiento del panel de control solar. Posteriormente, el diseño del sistema integra componentes de control, tales como sensores (LDR), actuadores y otros dispositivos destinados a supervisar y gestionar las regulaciones pertinentes al control, estos elementos implementan los principios fundamentales de la lógica difusa. Con el fin de evaluar si la ubicación del servomecanismo efectivamente optimiza la eficiencia del colector solar, se llevan a cabo mediciones de corriente, voltaje y potencia a intervalos regulares tanto del panel dispuesto de manera estática como del panel acoplado a los servomecanismos de posicionamiento. El estudio está relacionado con la presente investigación, dado que el análisis

comparativo propuesto permitirá determinar si la utilización de la energía solar disponible incrementa en 35% la potencia media diaria generada por un panel fotovoltaico al ser conectado a un sistema de seguimiento resulta más ventajosa en comparación con el rendimiento del mismo panel cuando se encuentra instalado de manera estática.

Laureano (2023) realizó un estudio sobre un análisis comparativo del rendimiento entre un sistema fotovoltaico de rastreador solar de doble eje y un sistema fotovoltaico de montaje fijo. Tuvo como objetivo obtener resultados concretos mediante un análisis comparativo de los rendimientos, centrado exclusivamente en la energía eléctrica generada por un módulo fotovoltaico fijo en comparación con la energía producida por un módulo equipado con un sistema de seguimiento solar, que se orienta constantemente a maximizar la captación de irradiancia solar. El análisis del sistema fotovoltaico instalado en el distrito de Los Olivos abarcó el periodo comprendido entre el 24 de septiembre y el 14 de octubre, durante las horas de 9 a.m. a 6 p.m. Además, se hizo un análisis del consumo de servomotores, sensores y tarjetas durante el período comprendido entre el 16 y el 20 de noviembre, en un horario de 9 a.m. a 6 p.m. La investigación es significativa dado que proporciona un marco para la evaluación comparativa del rendimiento energético de dos paneles fotovoltaicos con especificaciones idénticas, en condiciones meteorológicas que reflejan las características climáticas de Jaén.

Vilcanqui (2020) llevó a cabo una investigación centrada en el desarrollo de un sistema de seguimiento solar de doble eje para la autoconfiguración de paneles fotovoltaicos. El estudio analiza los componentes de un sistema fotovoltaico, así como las distintas modalidades de seguidores solares. Además, se llevó a cabo un examen de los enfoques de diseño fundamentados en la normativa alemana VDI 2206, aplicados a dispositivos mecatrónicos. En consecuencia, se inicia la identificación de la alternativa más viable mediante una evaluación técnico-económica, lo cual facilita el desarrollo del diseño conceptual de un sistema de seguimiento solar. El dispositivo permite una personalización integral de la orientación de los paneles fotovoltaicos, con el objetivo de maximizar la captación de radiación solar, haciendo uso de dos ejes de movimiento angular: acimut y altitud. La contribución fundamental del estudio, a esta investigación, radica en el desarrollo de un algoritmo que facilita la inicialización del sistema sin requerir una configuración inicial. Esto asegura una utilización óptima de los niveles de radiación solar incidente en los paneles fotovoltaicos a lo largo de todas las horas de luz solar, lo que a su vez garantiza la máxima recolección de energía solar.

1.1.3. Antecedentes Regionales/ Locales

Peña y Acuña (2022) llevaron a cabo un estudio enfocado en el desarrollo y diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica destinado a proporcionar electricidad a una comunidad rural, aprovechando la energía solar disponible en la región. El estudio llevó a cabo un análisis de la radiación solar en el mes de febrero y se desarrolló un sistema solar destinado a diecisiete viviendas y tres puntos de iluminación, utilizando paneles fotovoltaicos, baterías, controladores, inversores y cables especializados. Se realizó el diseño de la red secundaria de distribución eléctrica, así como la elaboración de un presupuesto para el proyecto. Desde una perspectiva económica, el valor actual neto (VAN) resultó ser negativo al llevar a cabo la evaluación económica utilizando una tasa de descuento del 10%. El proyecto presenta un desfase en términos de viabilidad económica; sin embargo, contribuirá a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2,1500 toneladas de CO₂ equivalente anuales. Este estudio es pertinente para la investigación actual, ya que los hallazgos indican que el potencial de radiación solar en la región (provincias de Jaén y San Ignacio) puede utilizarse para dimensionar un sistema fotovoltaico eficiente. Además, se demuestra que la implementación de un sistema fotovoltaico contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al cesar la liberación de CO₂ al medio ambiente, facilitando así la generación de energía limpia a través de un sistema fotovoltaico.

Zapana & Aucacahuaque (2021) llevaron a cabo un estudio que aborda el análisis comparativo del rendimiento de paneles fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos. El análisis se centró en la comparación de los hallazgos de diversas investigaciones que evaluaban el desempeño de los paneles fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos, con el fin de identificar la tecnología más eficiente bajo diversas condiciones. Además, se analizaron las condiciones climáticas de los estudios recolectados con relación a las de Cajamarca, con el objetivo de establecer una correlación y predecir el desempeño de estas tecnologías al implementarse en la mencionada ciudad. La metodología empleada incluyó la recolección, análisis y selección de materiales de investigación; adicionalmente, abarcó la evaluación y el procesamiento de datos en Excel vinculados a diversos parámetros meteorológicos tales como la irradiación, la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa. Los resultados obtenidos indicaron que los paneles fotovoltaicos monocristalinos exhibieron una eficiencia promedio del 11,83% bajo diversas condiciones, lo que refleja un incremento en el rendimiento del 2,29% en comparación con los paneles fotovoltaicos policristalinos. El estudio es relevante

para la investigación actual porque muestra que los paneles monocristalinos superan a los policristalinos en diversos climas. Los primeros alcanzaron una eficiencia del 11,83%, superior al 9,55% de los paneles policristalinos.

Mancilla y Pardo (2020) estudiaron el desarrollo de un sistema solar a escala. Este sistema incluye un seguidor solar que optimiza la captación de luz para cargar eficientemente la batería de un dispositivo móvil. Esta energía se transmite mediante una estación de carga para espacios públicos, beneficiando a más personas. La radiación solar se analiza comparando diversas fuentes de información. El prototipo de seguidor solar requirió un diseño electrónico detallado con motores paso a paso, controladores, microcontroladores y programación en Arduino. La estructura del prototipo del seguidor solar está hecha de materiales reciclables. Se buscó demostrar cómo un mecanismo electromecánico orienta automáticamente hacia el sol en altitud y azimut en fechas específicas. La investigación se vincula al proyecto en curso, ya que usa Arduino para la trayectoria solar, motores paso a paso y sensores de medidas fotovoltaicas.

Las investigaciones reseñadas indican que el potencial solar en Jaén permite dimensionar un sistema fotovoltaico eficiente, esto necesariamente conlleva la comparación del rendimiento de paneles solares estáticos con los que tienen seguimiento para optimizar la captación de energía solar durante las horas de luz.

1.2. Realidad Problemática

1.2.1. Problema

Basado en el título de la investigación el problema principal es esclarecer que panel fotovoltaico es más eficiente uno que es de orientación fija al sol respecto a otro que siga su trayectoria. A escala global, diversos acontecimientos de carácter universal, como el cambio climático, la degradación del medio ambiente, la escasez de recursos no renovables, los conflictos geopolíticos y las deficiencias en el suministro energético, están impulsando la investigación de alternativas energéticas limpias y eficientes, como la energía solar, con el objetivo de originar soluciones sostenibles (López, 2022), generando electricidad a partir de la radiación solar mediante paneles solares fijos o con seguidores, lo que representa una forma de convertir la energía solar en electricidad, reduciendo desechos nocivos para el medio ambiente (Bautista et al., 2022). Sin embargo, la eficiencia en la utilización de la energía generada por la radiación solar que incide sobre los paneles fotovoltaicos se ve significativamente afectada

por el ángulo de inclinación al que están orientados dichos paneles, lo que a su vez restringe la capacidad de utilizar la energía eléctrica de forma efectiva (Vidal, 2022).

La ciudad de Jaén posee en promedio una temperatura media de 25°C., debido a su proximidad a la línea ecuatorial y su altitud de 729 metros sobre el nivel del mar, tiene gran potencial para la energía solar fotovoltaica, su posición geográfica le proporciona la ventaja de recibir los rayos solares casi perpendicularmente durante la mayor parte del año, esto favorece una captación de energía solar eficiente si se ajustan los equipos de manera apropiada para maximizar el rendimiento de la energía solar disponible; no obstante, existe poca investigación para mejorar la eficiencia energética sostenible de los paneles. En particular, ningún proyecto a largo plazo ha introducido sistemas de energía solar con paneles capaces de seguir el camino de la radiación solar, o con otra tecnología que pueda aumentar la eficiencia en la recolección de energía solar.

De acuerdo a lo esbozado, la situación fáctica que originó la presente investigación radicó en la eficiencia de los paneles, basado en el título de la investigación el problema principal es esclarecer que sistema es más eficiente uno que es de orientación fija al sol respecto a otro que siga su trayectoria. por ello se ha realizado una comparación energética de estos dos sistemas utilizando tecnologías y programación disponible que se adaptó a las necesidades para poder optimizar los sistemas y calcular de manera cuantitativa el porcentaje de su eficiencia.

1.2.2. Formulación del Problema

¿Qué configuración de sistema fotovoltaico es más eficiente, uno con orientación fija al sol respecto a otro de seguimiento solar, en términos de generación de energía?

1.3. Justificación

La investigación se justifica en los siguientes aspectos:

1.3.1. Justificación Social

El análisis que compara la eficiencia de paneles solares fijos y de seguimiento solar justifica esta investigación al mostrar aspectos de relevancia social buscando concientizar a la población, en especial a las empresas privadas e incluso a las instituciones públicas que necesiten implementar un sistema fotovoltaico que consideren un sistema de seguidor solar.

1.3.2. Justificación Ambiental

El estudio de la eficiencia energética de paneles solares fijos respecto a los de seguimiento solar es vital para promover el uso eficiente de la energía solar, reducir la dependencia de combustibles fósiles, mitigar emisiones de gases de efecto invernadero y preservar recursos naturales. Se fomenta la sostenibilidad energética y se minimiza el impacto ambiental al utilizar energía solar. Promover tecnologías solares eficientes contribuye a un futuro más sostenible y a la lucha contra el cambio climático.

1.3.3. Justificación Técnica

Es crucial comparar la eficiencia energética de paneles solares fijos y de seguimiento solar para determinar cuál genera más energía. Esta investigación se basa en el principio fundamental de maximizar la incidencia perpendicular de la radiación solar sobre la superficie del panel a lo largo del día. Esta información optimizará la captación energética de paneles fotovoltaicos.

1.3.4. Justificación Económica

Un estudio sobre la eficiencia de paneles solares fijos versus uno con seguimiento es clave para evaluar su viabilidad económica. Es vital identificar la tecnología que ofrece el mejor rendimiento en costo para optimizar inversiones en infraestructura solar. Entender las fluctuaciones en la eficacia de la generación eléctrica ayuda a calcular más precisamente los beneficios económicos a largo plazo y el retorno de la inversión. Esto ayuda a inversores, empresas y gobiernos a tomar decisiones informadas sobre proyectos solares que optimicen beneficios económicos y fomenten energías renovables.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar comparativamente la eficiencia energética en la generación de energía entre un panel fotovoltaico fijo y otro con seguidor solar, instalados en el mismo lugar, con especificaciones técnicas iguales.

1.4.2. Objetivos Específicos

OE1. Recopilar información sobre el recurso energético solar disponible en el lugar de las pruebas, así como seleccionar los paneles fotovoltaicos con las mismas especificaciones técnicas y año de producción que serán objeto del estudio experimental.

OE2. Diseñar en software CAD (SolidWorks) la estructura de soporte para los paneles fijo y con seguidor solar respectivamente, se incluye el diseño electrónico, código para determinar la posición del sol, monitoreo y gestión de la energía generada.

OE3. Manufacturar los sistemas fotovoltaicos con apunte fijo y con seguidor solar, basados en los diseños realizados.

OE4. Realizar las mediciones de los parámetros eléctricos, para evaluar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Objeto de Estudio

El estudio se centró en realizar un análisis comparativo de la eficiencia en la producción de energía eléctrica entre dos tipos de paneles fotovoltaicos. Uno que se encuentra fijo, mientras que el otro está equipado con un mecanismo de seguimiento solar que permite optimizar la captación de luz solar a lo largo del día. Ambos paneles han sido instalados en una misma localización geográfica de la ciudad de Jaén y comparten especificaciones técnicas iguales, lo que facilita una comparación más precisa y relevante.

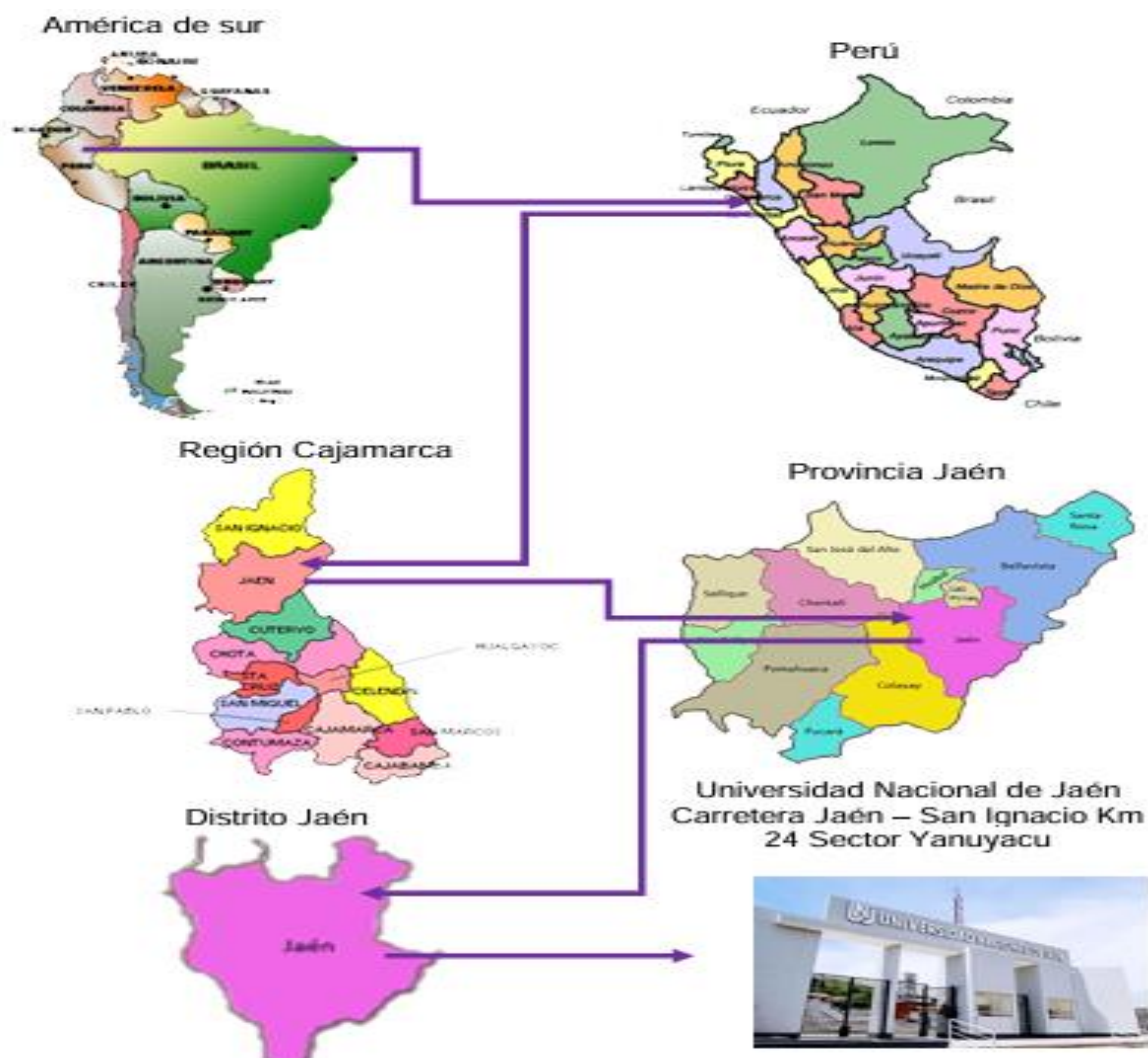
El objetivo de estudio es implementar un mecanismo y código que permita realizar una comparación de energía de los paneles fotovoltaicos fijo y con seguidor solar a través de electrónica embebida, para optimizar el proceso de lectura de datos y movimiento preciso del seguidor solar.

2.2. Ubicación del Área de Estudio

La presente investigación se realizó en la azotea del pabellón de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, la cual se encuentra ubicada en el Km 24 de la carretera Jaén – San Ignacio Km, Sector Yanuyacu - Jaén – Cajamarca – Perú, a una altitud de 645 msnm, entre los 5°40'33.47'' sur y 78°46'40.27'' oeste, aproximadamente.

Figura 1

Ubicación geográfica de la Universidad Nacional de Jaén



Nota: Fuente Elaboración Propia

2.3. Tipo y Diseño de la Investigación

2.3.1. Tipo de Investigación

Según la naturaleza de la investigación, se clasifica como cuantitativa, dado que los resultados finales se presentan en términos de magnitudes medibles. Por su orientación es de

tipo aplicado y tecnológico, dado que los conocimientos contemporáneos sobre el uso de paneles solares se implementan directamente en la resolución de problemas en un sector de la sociedad, además de contribuir al desarrollo productivo. Los avances tecnológicos y los estudios realizados a nivel internacional relacionados con las nuevas tecnologías de paneles solares son incorporados en el diseño de instalaciones solares fotovoltaicas. De acuerdo con su enfoque temporal, el estudio se clasifica como transversal, ya que se han recopilado datos durante un período de 25 días, abarcando desde el 17 de mayo al 11 de junio del año en curso. Por su nivel la presente investigación se clasifica como descriptivo, puesto que su objetivo es comprender e identificar la relación entre las variables en estudio.

2.3.2. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es de naturaleza no experimental. Como señala (Castro et al., 2023) en estas investigaciones no se pretende manipular las variables; en cambio, se enfoca en la observación de los fenómenos tal como ocurren en su contexto natural. Este estudio tiene como objetivo enriquecer la comprensión del tema en cuestión y proporcionar una perspectiva fundamentada, que pueda ser empleada en investigaciones futuras. En este sentido se empleó un diseño descriptivo comparativo, dado que la información se recopila de diversas muestras pertenecientes a un mismo objeto de estudio, con el propósito de caracterizarlo mediante un análisis comparativo, según lo señala (Espinoza, 2014).

2.4. Población, Muestra y Muestreo

2.4.1. Población

La población de estudio estuvo compuesta por los dos paneles solares. A estos paneles se les realizó una medición de la energía eléctrica que producen, teniendo en cuenta que uno de ellos está en una posición fija, mientras que el otro se ajusta y se orienta de acuerdo con el movimiento del sol a lo largo del día.

2.4.2. Muestra

Constituida por los parámetros eléctricos asociados con la generación de energía de cada panel, corriente y voltaje. Se componen de las actividades que se llevaron a cabo en los dos tipos de panel, tanto el fijo como el que sigue la trayectoria solar. Es importante destacar que la irradiancia solar se evaluó de manera indirecta mediante la cuantificación de la energía eléctrica generada por cada panel fotovoltaico. La recolección de datos se llevó a cabo durante

un mínimo de 25 días, tras lo cual se procedió a realizar la evaluación comparativa. Las muestras fueron recolectadas por un sistema automatizado y programado por la tarjeta de desarrollo ESP32, a intervalos de 30 segundos, durante el periodo de días antes mencionados (equivalente a un mes calendario) en la azotea del pabellón de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén.

2.4.3. Muestreo

Constituido por las diversas características que se usaron para llevar a cabo el registro de las mediciones. En este marco de referencia, para ello se estableció realizar mediciones cada 30 segundos para tener una mayor precisión al momento de analizar los datos. Esto incluyó la recopilación de las mediciones de corriente y voltaje que cada panel solar genera de manera simultánea, asegurando así una comprensión completa del rendimiento de estos.

2.5. Metodología de Investigación

2.5.1. Métodos

De acuerdo con la metodología utilizada se puede afirmar que se trata de un estudio de naturaleza cuantitativa. Esto significa que el enfoque adoptado está centrado en la recolección y análisis de datos numéricos. La investigación se caracteriza por la utilización de indicadores cuantitativos que permiten medir las variables, así como la aplicación de estadísticas descriptivas que ayudan a resumir y describir las características de los datos recopilados. Incluso se ha llevado a cabo pruebas específicas como parte integral de este enfoque investigativo. Los estudios que se basan en la lógica y el razonamiento sistemático juegan un papel fundamental en la obtención de una representación clara y completa de la población que se encuentra en el foco de análisis en la investigación (Ruiz y Valenzuela, 2022).

Por su alcance, esta investigación se la define como un estudio descriptivo, según Hernández Sampieri et al., (2014), porque tiene como propósito primordial la identificación de características o propiedades específicas de un fenómeno, en relación con los objetivos planteados en el estudio. En resumen, este es un estudio de tipo cuantitativo y descriptivo, en este sentido, con el propósito de llevar a cabo la investigación, se procedió no solo a la identificación del problema, sino también a la recopilación de documentos y equipos que puedan contribuir al desarrollo del estudio.

Rizal et al (2008), describe el procedimiento matemático que debe seguir el algoritmo de posición solar (SPA) para determinar la ubicación del sol en tiempo real y en cualquier parte del mundo con un margen de error de $\pm 0.0003^\circ$.

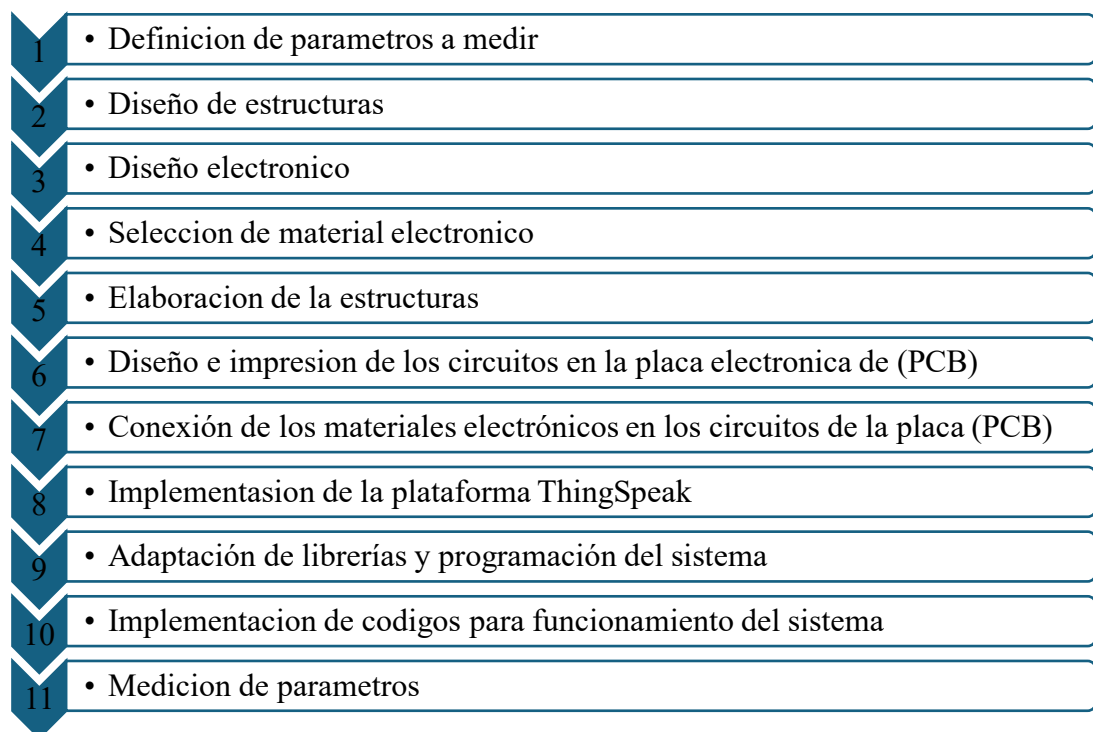
Los elementos más significativos en este contexto incluyeron los paneles solares, las tarjetas de desarrollo ESP32, la librería Solar Position Algoritmo (SPA), así como la estructura de los paneles tanto fijo como móvil, entre otros.

2.5.2. Procedimientos

En la figura 2, se detalla el procedimiento que se siguió para llevar a cabo esta investigación y los cuales se detallan de acuerdo con los objetivos específicos.

Figura 2

Procedimiento que se llevó en la investigación



Nota: Fuente Elaboración Propia

2.5.3. Definición de Parámetros.

Para llevar a cabo el proyecto de comparación energética, se definió los parámetros a medir:

- Voltaje: del panel con seguidor solar y del panel fijo.

- Corriente: del panel con seguidor solar y del panel fijo.

De forma indirecta se estaría midiendo la radiación solar a través de la conversión de energía y comparando los datos meteorológicos brindados por la página web NASSA POWER.

2.5.4. Diseño de las Estructuras.

Para el diseño de la estructura se tenía el objetivo definido. Para la estructura con seguidor solar se consideró que tendría dos grados de libertad permitiendo moverse en su eje vertical como horizontal. Para la estructura fija se consideró el ángulo de inclinación y la altura que debe estar el panel desde el techo, con estas consideraciones se elaboró el diseño en SolidWorks y se realizó la simulación para comprobar su funcionamiento. En resultados y anexos se detalla las dimensiones y dibujo técnico.

2.5.5. Diseño Electrónico.

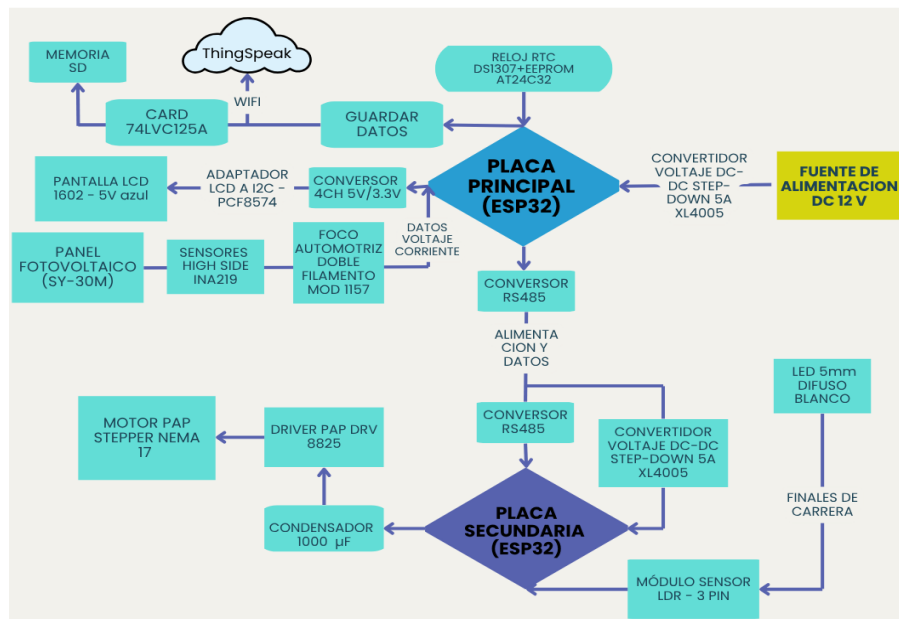
El diseño electrónico se realizó dos placas de mando para que la placa principal estuviera en un lugar seguro de lluvias e humedad, la placa secundaria estuvo a la intemperie junto a los paneles fotovoltaicos. El diseño se realizó en el software KidCad 8.0 (versión gratuita), permitiendo interactuar con los circuitos.

2.5.6. Selección de Material Electrónico.

Para la selección de material electrónico se hizo en función del diseño electrónico teniendo en cuenta las características del sistema y a lo que tenía que estar expuesto. En el siguiente diagrama se detalla el proceso y funcionamiento de cada pieza electrónica.

Figura 3

Diagrama del sistema electrónico y sus funciones



Nota: El diagrama se elaboró para muestra las funciones que llevara a cabo cada componente electrónico.

2.5.7. Elaboración de las Estructuras.

Para la elaboración de la estructura se tuvo como referencia el diseño realizado en el software SolidWorks, a partir de ello se buscó los materiales para ambas estructuras, se consideró conveniente usar perfiles metálicos y de aluminio, en resultados y anexos se detalla la medida y tipo de los materiales.

2.5.8. Diseño e Impresión de los Circuitos en la Placa Electrónica de (PCB).

El diseño de los circuitos en la placa electrónica (PCB) se realizó para dar seguridad y estética al circuito electrónico. Ya realizado el diseño electrónico en el programa KidCad 8.0, se tenía que pasar este diseño a los programas Candle y FlatCam para que con ayuda de la maquina CNC imprima los circuitos a la placa PCB.

2.5.9. Conexión de los Materiales Electrónicos en los Circuitos de la Placa (PCB).

Ya comprado los materiales electrónicos y realizado las placas de PCB se procedió a conectar, teniendo como referencia el diseño electrónico realizado en el programa KidCad 8.0. para ello se utilizó conectores y regletas de pines. En la parte de resultados se da más detalles.

2.5.10. Implementación de la Plataforma ThingSpeak.

La implementación del programa ThingSpeak se realizó con el propósito de monitorear en tiempo real las mediciones que suba el sistema, esta plataforma virtual es compatible con la interfaz del programa y el sistema. Para ello se personalizo para ver a detalle los gráficos de voltaje y corriente de ambos sistemas.

2.5.11. Adaptación de Librerías y Programación del Sistema.

Se adapto la librería Solar Position Algorithm (SPA), la cual se encarga de calcular la posición solar a través de ecuaciones astronómicas en relación a la ubicación geográfica, fecha y hora. Así mismo se programó los códigos para que funcionara el sistema, entre ellos está el código de los sensores, memoria SD, motor y de guardar datos en la nube. Para los códigos se utilizó el lenguaje de programación C++, el cual es compatible con Arduino IDE. Mas detalles se brindan en el enunciado de resultados y en anexos.

2.5.12. Implementación de Códigos para Funcionamiento del Sistema

Para la implementación de los códigos se debe verificar que las estructuras estén correctamente funcionando en sus dos ejes y revisar sus respectivas conexiones, una vez este todo correctamente elaborado se procede a insertar el código de la programación en el microcontrolador principal.

2.5.13. Medición de Parámetros

Para la medición de parámetros se necesita que todo el sistema electrónico y seguidor solar esté funcionando para que los datos se guarden en la memoria y en el ThingSpeak, para luego ser procesado en el software Excel.

2.6. Técnicas

Las principales técnicas para la recolección de datos fueron mediante censado automático utilizando sensores de conexión directa, el cual tomaban lectura de forma constante cada 30 segundos, este instrumento de medición de voltaje y corriente de la marca Texas Instruments fue el modelo High Side INA219.

Las actividades destinadas a la recolección de datos se llevaron mediante el uso de herramientas de electrónica digital. Estas herramientas fueron fundamentales para operar los dispositivos y para registrar con precisión las mediciones que proporcionan los sensores, los cuales están enfocados en la captación de diversos parámetros eléctricos que se integran en el desarrollo de la investigación. En el transcurso de la investigación realizada se emplearon las herramientas que se detallan a continuación.

Guías de observación: usado para corroborar el funcionamiento del sistema de medición automatizado.

Ficha de análisis de documentos: se empleó para recopilar información y datos contenidos en tesis, normas técnicas peruanas, revistas, manuales técnicos, relacionados con la investigación.

2.7. Registro y Análisis de Datos.

2.7.1. Registro de Datos

Se usaron tecnologías de electrónica programable para medir continuamente el voltaje y corriente de cada panel, registrando los datos en una memoria SD y enviándolos a servidores en la nube de ThinkSpeak.

2.7.2. Análisis de Datos

Para el análisis de datos se empleó el software Excel para ordenar, clasificar y graficar los valores de las mediciones de los sensores.

- ✓ Se compararon ambas curvas diariamente, obteniendo la razón de la energía generada con ambos sistemas diariamente, se promedió cada hora del día para obtener una curva promedia durante las horas solares diarias.

- ✓ Se promediaron todas las curvas diarias, y a partir de ellas estimar la razón entre ambas curvas promediadas por día, para obtener la razón entre ellas durante el periodo de 25 días.

2.8. Materiales

Para realizar esta investigación, se utilizó los siguientes materiales:

2.8.1. Panel Solar Monocristalino SY-30M

Fue uno de los materiales más importantes dado que en función de ellos se obtuvo los valores de voltaje y corriente, los cuales fueron fundamentales para realizar la comparación energética de los dos paneles fotovoltaicos tanto el móvil y el fijo. Para esta comparación se obtuvo dos paneles con las mismas especificaciones técnicas y año de fabricación.

Figura 4

Panel fotovoltaico monocristalino SY.30M



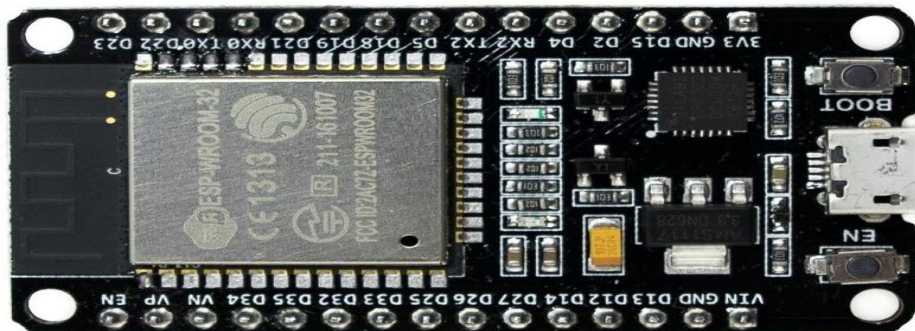
Nota: Fuente fotografía propia

2.8.2. Tarjeta Electrónica ESP32

Se uso dos microcontroladores que integra diversos protocolos de comunicación inalámbrica como: Wifi, Bluetooth y BLE, Además permite el desarrollo de aplicaciones en diferentes lenguajes de programación, frameworks, librerías y diversos recursos. Los más comunes a elegir son: Arduino (en lenguaje C++), MicroPython, LUA, Esp-idf. Al trabajar dentro del entorno Arduino podremos utilizar un lenguaje de programación conocido y hacer uso de un IDE sencillo de utilizar, además de hacer uso de toda la información sobre proyectos y librerías disponibles en internet, estas especificaciones técnicas fueron tomadas del catálogo de Naylamp Mechatronics. Por lo tanto, esta tarjeta fue ideal para la investigación, ya que permitió la conexión de forma remota, el cual se puede adaptar para enviar las mediciones obtenidas a la plataforma ThinkSpeak.

Figura 5

Microcontrolador ESP 32



Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], por Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com> quiere abrir esta app)

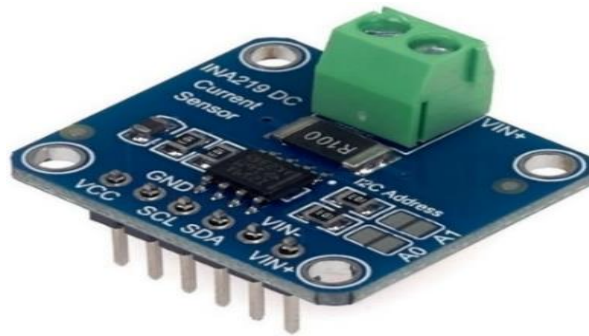
2.8.3. Sensor High Side INA219

Permite medir simultáneamente el voltaje y corriente DC en el rango de 0 a 25 voltios y 0 a 3.2 amperios a través de una interfaz I2C (Inter-Integrated Circuit), el cual es un protocolo de comunicación serial utilizado para conectar circuitos integrados.

Incorpora una resistencia Shunt interna para medir la corriente de 0,1 ohmios y 1%. El ADC interno del INA219 es de 12 bits que proporciona una resolución de 0,8 mA en un rango de 3,2 A, estas especificaciones técnicas fueron tomadas del catálogo de Naylamp Mechatronics. para este proyecto se utilizaron dos unidades para medir el voltaje y corriente en DC de ambos sistemas fotovoltaicos.

Figura 6

Sensor de voltaje y corriente INA219



Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/559-monitor-de-corriente-voltaje-high-side.htm>)

2.8.4. Motor Paso a Paso (Motor Pap Stepper Nema 17 - 1.7A 0.49N.m SL42STH48-16)

Se utilizo dos motores paso a paso porque son de gran precisión en el control de posicionamiento, es de tipo bipolar de 4 cables, corriente nominal por fase es de 1.7A, corriente por fase es de 1.68 A, voltaje nominal por fase es de 2.8 V, su voltaje de alimentación es de 12 a 24 V. torque máximo es de 5kg.cm o 0.4 N.m, para dar una vuelta completa (360°) da 200 pasos de 1.8° cada uno, estas especificaciones técnicas fueron tomadas del catálogo de Naylamp Mechatronics. Estos motores se encargan de mover la estructura del panel con seguidor solar en dos grados de libertad, eje vertical como horizontal para que este perpendicular a la posición del sol.

Figura 7

Motor Stepper Nema 17



Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/motores-pap-steppers/287-motor-pap-stepper-nema17-sl42sth48-1684a.html>)

2.8.5. Driver Pap DRV8825 1.5 A

Se usaron dos drivers Pap DRV8825 permite controlar motores paso a paso bipolares de hasta 2.5 A. Permite regular la corriente máxima de salida por medio de un potenciómetro. Trabaja con voltajes de alimentación entre 8.2V a 45V, puede suministrar 1.5 A por bobina sin usar ventilación forzada o un disipador y soporta picos de corriente de hasta 2.5 A. Trabaja con 6 resoluciones de paso full-step, half-step, 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32, estas especificaciones técnicas fueron tomadas del catálogo de Naylamp Mechatronics. Para manejar el driver solo son necesarios 2 pines, uno para la dirección de giro (DIR) y otro para dar el paso (STEP). El pin Enable debe estar conectado a Tierra (GND)

Figura 8

Driver PAP DRV 8825



Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/driver-pap-stepper/126-driver-pap-drv8825.html>)

2.8.6. Módulo Max485 Conversor RS485 a Serial TTL

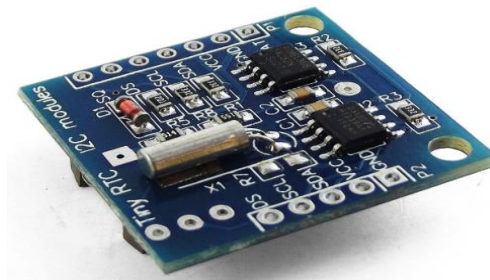
Permite agregar comunicación RS485 a Arduino con la ventaja de lograr distancias de conexión mucho mayores, permite conectar microcontroladores como Arduino a distancias de hasta 1km. Tiene un sistema de bus transmisión multipunto diferencial lo que le permite transmitir señales a alta velocidades sobre larga distancias, estas especificaciones técnicas fueron tomadas del catálogo de Naylamp Mechatronics. En este proyecto se utilizó dos módulos para enviar y recibir datos, como activar a los motores y para activar los sensores de movimiento como final de carrera.

2.8.7. Módulo RTC DS1307 + EEPROM AT24C32 (I2C)

Es un reloj el cual se implementó para informar al código la fecha, hora, minuto y segundo en tiempo real, así mismo se utiliza los datos del tiempo referenciados para guardar los datos en la memoria, en el ThingSpeak y para activar los motores de paso nema 17, teniendo como referencia la fecha y hora en tiempo real.

Figura 9

Reloj RTC DS1307



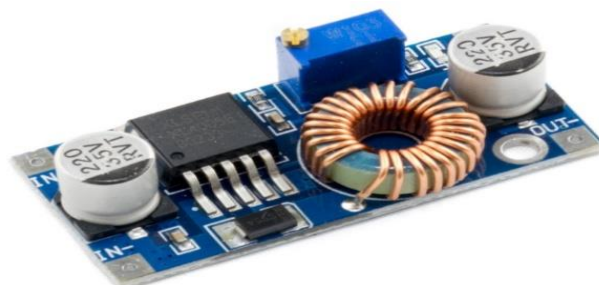
Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/sensores/30-modulo-rtc-ds1307-eeeprom-at24c32-i2c.html>)

2.8.8. Convertidor Voltaje DC-DC STEP-DOWN 5A XL4005

Se uso dos módulos de convertidores de voltaje, ya que son circuitos capaces de transformar un nivel de voltaje a otro de mayor o menor nivel. Por sus características técnicas permite reducir el voltaje de la forma más eficiente, ya que su voltaje de entrada es de 5.0 V a 32 V DC y su voltaje de salida: 0.8V a 30V DC, con una corriente de salida 5 A como máximo, estas especificaciones técnicas fueron tomadas del catálogo de Naylamp Mechatronics. En este proyecto se utilizó estos módulos ya que la fuente de alimentación es de 12 V, y los circuitos internos trabajan a 5 y 3.3 V.

Figura 10

Convertidor Voltaje DC-DC Step-Down 5A XL4005



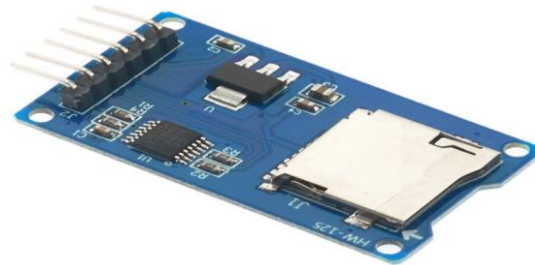
Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/conversores-dc-dc/49-convertidor-voltaje-dc-dc-step-down-5a-xl4005.html>)

2.8.9. Módulo Lector de Memoria Micro SD Card 74LVC125A:

Almacena y lee grandes cantidades de datos de tarjetas micro SD usando cualquier microcontrolador de forma sencilla. Incluye el chip **MC74VHCT125A/74LVC125A** como circuito de conversión de voltaje lógico para comunicarse a 3.3V o 5V. Puede ser alimentado hasta con 5V gracias a su regulador de voltaje incluido en placa.

Figura 11

Lector de memoria Micro SD Card 74lvc125A



Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/almacenamiento/104-modulo-lector-de-memoria-micro-sd-card-lvc125a.html>)

2.8.10. Display Alfanumérico LCD 1602 - 5V azul:

Pantalla alfanumérica de 2 filas y 16 columnas. Backlight tipo LED color azul. Interface paralela. Para las lecturas de voltaje y corriente en tiempo real.

Figura 12

Pantalla LCD 1602 - 5V Azul



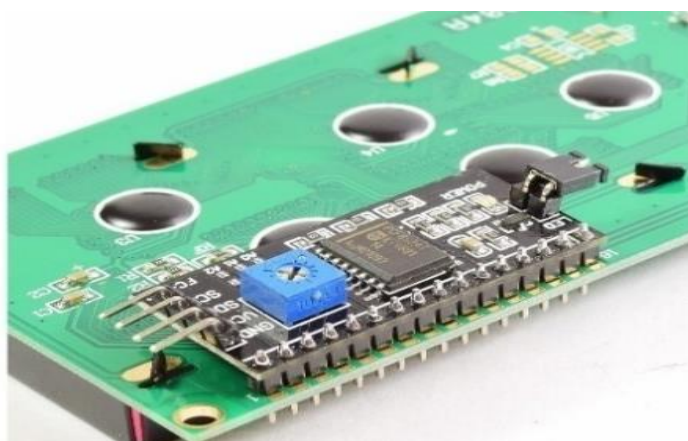
Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, 2025, (<https://naylampmechatronics.com/lcd-alfanumerico/1323-display-alfanumerico-lcd-1602-5v-azul-con-pines-soldados.html>)

2.8.11. Módulo Adaptador LCD a I2C - PCF8574

Módulo adaptador LCD a I2C, permite manejar un display LCD utilizando tan solo 2 pines de tu Arduino.

Figura 13

Adaptador LCD a I2C PCF8574



Nota: Adaptado de la página web del proveedor [fotografía], Naylamp Mechatronics, <https://naylampmechatronics.com/buscar?controller=search&s=Adaptador+LCD+a+I2C+PCF8574>)

2.8.12. Conversor de Nivel Lógico 4CH 5V/3.3V

Módulo conversor/adaptador de niveles lógicos, ya sea de 3.3V a 5V o a la inversa (5V a 3.3V), 4CH indica que utiliza cuatro canales independientes para la conversión de señales. Se utilizó en el proyecto para comunicar las señales lógicas del ESP 32 de 3.3 V a la Display Alfanumérico LCD 1602 que trabaja con señales de 5 V.

2.8.13. Módulo Sensor LDR - 3 pin

Es un dispositivo cuya resistencia varía de acuerdo con la cantidad de luz que reciba, lo utilizamos como componente para el final de carrera de una tuerca desplazable del sistema de tornillo sin fin para el desplazamiento vertical del seguidor solar.

2.8.14. LED 5mm Difuso Blanco

Este led tiene la cubierta difusa, por lo que la luz se difumina por casi todo el led, fue utilizado como componente de final de carrera del sistema de tornillo sin fin para el desplazamiento vertical del seguidor solar.

2.8.15. Batería CR2032

Es una batería de litio de 3V CR2032, utilizada en los módulos RTC DS1307, se manejó para conservar la hora cuando el circuito no está energizado.

2.8.16. Bornera KF301-2P

Se utilizó para conectar los diferentes circuitos electrónicos con la placa principal, así como para conectar la alimentación, datos de entrada y de salida.

2.8.17. Conector DC Bornera a Plug Jack DC H-M

Este adaptador permite conectar un conector de alimentación como cable de datos ya que en un extremo tiene una regleta para atornillar, y el otro tiene un Jack Barrel centro-positivo de 5,5mm x 2,1mm. Por lo cual se utilizó en el proyecto para energizar, enviar y recibir datos a las cajas de los circuitos.

2.8.18. Cable Dupont

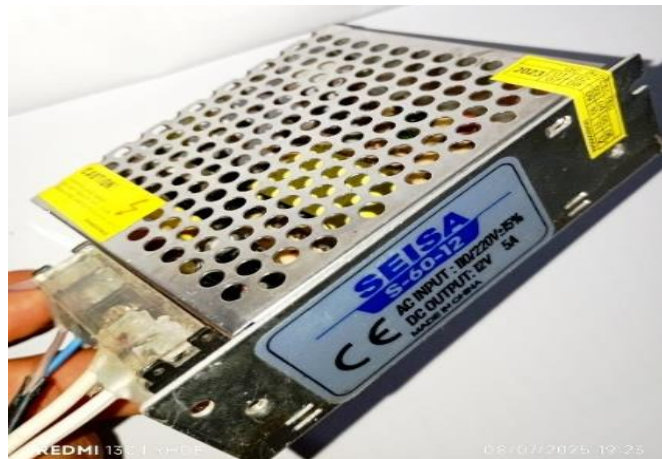
Sirve para conectar los circuitos integrados como el ESP32, Driver Pap DRV8825, motor nema 17, sensor de voltaje y corriente.

2.8.19. Fuente de Alimentación

Para alimentar los motores, en este caso se utilizó una fuente de energía de un pc, cargador o una batería de 12V.

Figura 14

Fuente de alimentación DC 12V



Nota: Elaboración Propia

2.8.20. Ferretería

Para la construcción del sistema con seguidor solar se usaron perfiles metálicos de tubo rectangulares, una platina, perfiles de aluminio rectangulares, tipo L y circular. Como eje principal de la estructura se utilizó una varilla circular. La estructura se unió con pernos, tuerca y arandelas.

Para la estructura del sistema fijo se utilizó perfiles de aluminio tipo L, lo cual se construyó en forma de triángulo. Para su unión se usaron pernos con tuerca y arandela.

2.8.21. Chumacera

Se utilizó dos chumaceras tipo rombo de 3/4", modelo UCFL 204-12 MSB, fabricado por la empresa SKF.

III. RESULTADOS

3.1. O.E.1: Recopilación de Información del Recurso Energético Disponible y Selección de Paneles Fotovoltaicos

En la valoración del rendimiento energético de los dos paneles solares implementados no se ha considerado únicamente la radiación solar como la fuente principal de energía en la generación eléctrica a través de paneles, sino también la estrecha interrelación entre las variaciones climáticas y atmosféricas. Este análisis incluye variables tales como la temperatura ambiental, temperatura interna de los paneles solares, precipitación, velocidad del viento, cobertura nubosa y la irradiancia. Todas estas variables están interrelacionadas con la presencia de vapor de agua en la atmósfera, el cual se manifiesta en forma de humedad y se refleja en el proyecto al momento de medir voltaje y corriente.

3.1.1. Datos Meteorológicos Diarios en la Universidad Nacional de Jaén

En la tabla 1, se presentan diversos parámetros relacionados con las condiciones climáticas, entre los cuales se incluyen la temperatura media medida a una altura de 2 metros sobre la superficie del suelo, expresada en grados Celsius (T2M-°C). Asimismo, se detallan la temperatura mínima alcanzada a esa misma altura de 2 metros (T2M_MIN-°C) y la temperatura máxima registrada en el mismo nivel (T2M_MAX-°C). Adicionalmente, se proporcionan datos sobre la irradiancia descendente de onda corta que incide sobre toda la superficie del cielo, la cual se mide en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (ALLSKY_SFC_SW_DWN -kW-h/m²/día). También se incluye la irradiancia descendente de onda larga para toda la superficie del cielo, igualmente expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (ALLSKY_SFC_LW_DWN-kW-h/m²/día).

Tabla 1

Datos meteorológicos diarios en la Universidad Nacional de Jaén

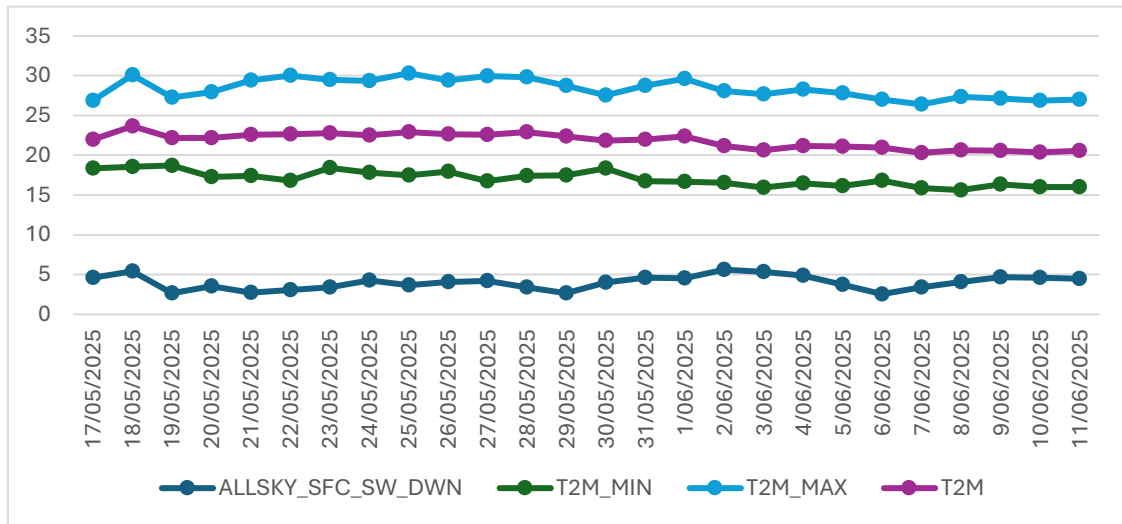
FECHA	ALLSKY_SFC SW_DWN	ALLSKY_SFC LW_DWN	T2M_MIN	T2M_MAX	T2M
17/05/2025	4.58	9.26	18.33	26.87	22
18/05/2025	5.44	9.01	18.55	30.09	23.66
19/05/2025	2.65	9.41	18.72	27.3	22.21
20/05/2025	3.57	9.42	17.28	27.94	22.21
21/05/2025	2.76	9.19	17.43	29.45	22.61
22/05/2025	3.07	9.15	16.79	30.05	22.63
23/05/2025	3.41	9.31	18.45	29.47	22.78
24/05/2025	4.29	9.27	17.79	29.32	22.51

25/05/2025	3.65	9.49	17.49	30.32	22.9
26/05/2025	4.08	9.46	17.92	29.4	22.65
27/05/2025	4.19	9.16	16.73	29.96	22.56
28/05/2025	3.4	9.14	17.39	29.84	22.93
30/05/2025	3.99	9.32	18.33	27.57	21.87
31/05/2025	4.63	9.03	16.76	28.73	21.99
1/06/2025	4.55	8.76	16.65	29.6	22.4
2/06/2025	5.62	8.29	16.56	28.07	21.19
3/06/2025	5.34	8.39	15.97	27.65	20.63
4/06/2025	4.89	8.78	16.51	28.3	21.2
5/06/2025	3.75	9.24	16.15	27.81	21.13
6/06/2025	2.55	9.46	16.81	27.03	20.95
7/06/2025	3.42	9.46	15.88	26.4	20.31
8/06/2025	4.08	9.26	15.63	27.31	20.66
9/06/2025	4.68	9.23	16.36	27.11	20.59
10/06/2025	4.63	9.32	16.04	26.87	20.39
11/06/2025	4.46	9.33	16.02	26.98	20.59

Nota: Información proporcionada por la predicción de la NASA del programa Worldwide Energy Resource (Power), que data del año 2025, puede acceder a los datos a través del siguiente enlace: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Figura 15

Gráfico de radiación, temperatura máxima, mínima y media durante los días de medición.



Nota: Fuente elaboración Propia

3.1.2. Hora Solar Pico (HSP) en Jaén

La hora solar pico es la cantidad de horas en un día que recibe una radiación de 1000 w/m². Para calcular la hora solar pico en la ciudad de Jaén se consideró los 25 días donde se tomaron los datos de medición y utilizando los datos de radiación para la superficie de la tabla 1, se calcula la HSP.

$$HSP = \frac{\text{irradiancia (kWh/m}^2\text{/día)}}{1000 \text{ W/m}^2}$$

$$HSP_{prom} = \frac{4.067 \text{ (kWh/m}^2\text{/día)}}{1000 \text{ W/m}^2}$$

$$HSP_{prom} = 4.067 \text{ h/día}$$

Tabla 2

Hora solar pico máximo y mínimo

Fecha	HSP (horas/día)	
02/06/2025	HSP max	5.62
06/06/2025	HSP min	2.55
Promedio		4.067

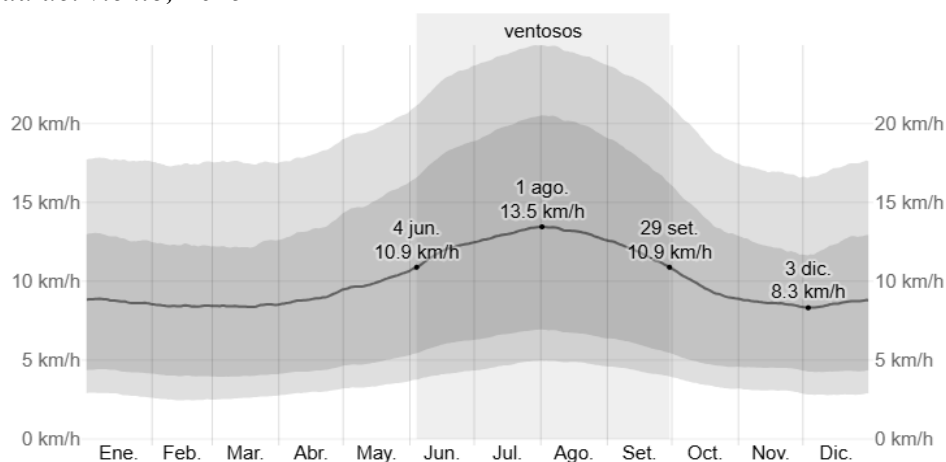
Nota: En la tabla se muestra la hora solar mínima, máxima y el promedio durante los días de medición.

3.1.3. Velocidad del Viento

La velocidad media del viento por hora en Jaén presenta notables variaciones estacionales a lo largo del año. La temporada con mayor intensidad de vientos se extiende a lo largo de 3.8 meses, desde el 4 de junio hasta el 29 de septiembre, durante la cual se registran velocidades promedio del viento superiores a 10.9 kilómetros por hora. Según la gráfica de la página meteorológica Weather Spark, los meses de mayo y junio presentaron velocidades de viento moderado, lo que influye positivamente en la conversión de energía de los paneles, porque reduce las pérdidas de energía por calentamiento de las celdas fotovoltaicas, mejoras por enfriamiento. Vientos extremos puede producir efecto vela produciendo desprendimiento de los paneles oh daños de la estructura. Para esta investigación el efecto vela no se reflejó a lo largo del periodo de toma de datos, pero si hubo momentos donde la estructura con seguidor solar giraba de forma horizontal en dirección del viento, para evitar dichos giros no calculados por el código establecido, se programó que el motor de acimut se mantuviera prendido durante la salida y puesta del sol, esto evito que el viento hiciera girar la estructura ya que el motor se mantenía en el punto donde el código le ordenaba girar. Para el movimiento de elevación no se presentó inconvenientes ya que se usó un tornillo trapezoidal que actuaba como bloqueador de movimiento y solo movía la estructura si el motor giraba.

Figura 16

Velocidad del viento, 2025



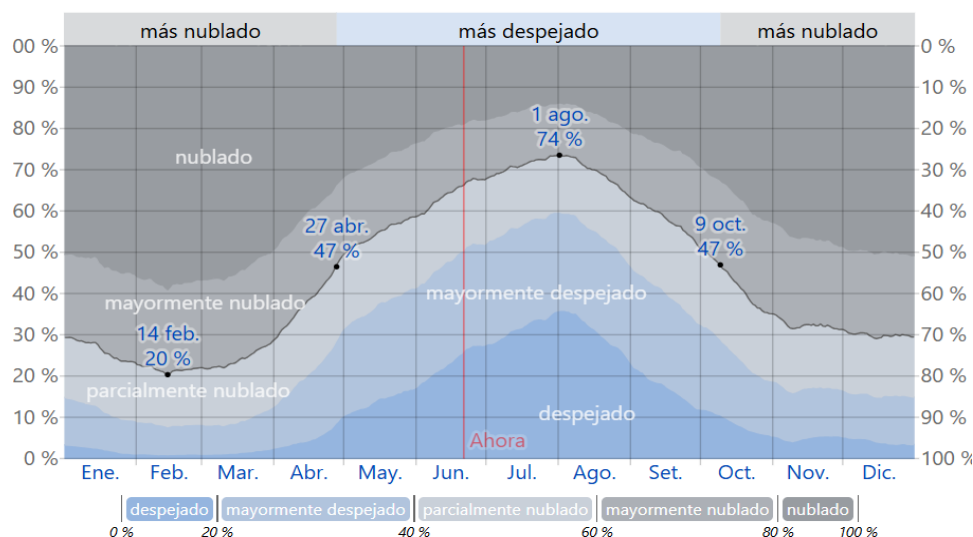
Nota: la figura muestra una estimación de la velocidad del viento para el año 2025 en la ciudad de Jaén, adaptado de página web Weather Spark, [fotografía], Weather Spark, 2025, (<https://es.weatherspark.com/y/19992/Clima-promedio-en-Ja%C3%A9n-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-WindSpeed>)

3.1.4. Cobertura Nubosa

Si bien es cierto la nubosidad afecta la captación energética de los paneles fotovoltaicos porque este fenómeno bloquea y dispersa la luz solar, lo que a su vez disminuye la radiación directa de los paneles fotovoltaicos, lo que implica una baja producción energética. Sin embargo, las celdas fotovoltaicas siguen produciendo energía captando la radiación difusa. Para los meses de toma datos la página Weather Spark estimo que en la ciudad de Jaén el cielo estaría 55% y 63 % despejado, lo que demuestra cierta precia de nubes y esto se reflejó en la captación energética de los sistemas fotovoltaicos.

Figura 17

Presencia de nubosidad



Nota: La figura muestra una estimación de la nubosidad para el año 2025 en la ciudad de Jaén, adaptado de página web Weather Spark, [fotografía], Weather Spark, 2025, (<https://es.weatherspark.com/y/19992/Clima-promedio-en-Ja%C3%A9n-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-CloudCover>)

3.2. Selección de los Paneles Fotovoltaicos

Se llevó a cabo una investigación sobre paneles equipados con seguidores solares, así como sobre bibliotecas de seguimiento solar como el SPA (Solar Position Algorithm). Este algoritmo emplea parámetros de entrada tales como la fecha, la hora local y la ubicación geográfica (latitud y longitud) para calcular la posición solar, expresada en términos de ángulo de elevación (altitud) y ángulo de acimut. Dicho cálculo se fundamenta en ecuaciones matemáticas preexistentes que permiten determinar la trayectoria solar.

En la selección de paneles fotovoltaicos se tomó en cuenta aspectos, como tipo de paneles y eficiencia de conversión energética.

Según (Zapana Marchan & Auccahuaque Mariñas, 2021) realizaron un análisis comparativo de los paneles fotovoltaicos Monocristalinos y Policristalinos sometidos a diferentes condiciones meteorológicas, obteniendo como resultado que el sistema con el más óptimo rendimiento en diferentes condiciones climáticas es el Monocristalino, el cual obtuvo una eficiencia promedio para todos los estudios de 11.83% superior al 9.55% obtenido para los paneles Policristalinos; este resultado corresponde a estudios seleccionados dentro de los últimos 10 años.

Para el presente proyecto se usó dos paneles fotovoltaicos monocristalinos ya que diferentes fuentes y fabricantes sugieren que en general son los más eficientes en el mercado actual, según Moran (2022) indica que alcanzan una eficiencia superior al 20%.

Es fundamental elegir dos paneles que sean del mismo modelo, año de fabricación y marca, así como que compartan especificaciones técnicas equivalentes. Por lo que se consideró conveniente la adquisición de los paneles 30W SY-30 OPALUX, del mismo lote de fabricación, ya que esto aumentó la confiabilidad, a pesar de que las diferencias sean mínimas.

3.3. O.E.2: Diseño Electrónico, Estructural de los Soportes y Programación del Seguidor Solar

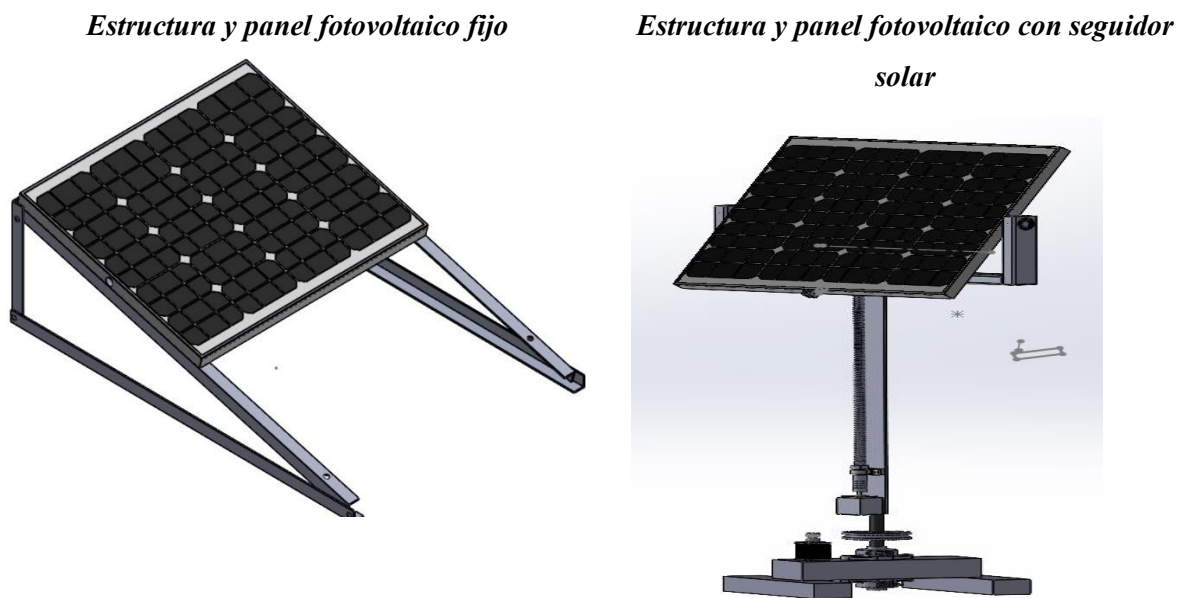
3.3.1. Diseño de las Estructuras de soporte para los paneles

El diseño de las estructuras tanto para el sistema fijo como para el que se mueve utilizando un seguidor solar, se realizó utilizando software CAD, específicamente SolidWorks, y se tuvo en cuenta cuidadosamente las dimensiones exactas de los paneles para asegurar una

correcta instalación y funcionamiento. El diseño que se llevó a cabo actuó como un punto de referencia fundamental para la producción de los dos soportes. En este proceso, se consideraron detenidamente las condiciones ambientales a las que los materiales estarían expuestos. Dado que el enfoque de esta investigación se centra en evaluar y comparar la eficiencia energética de ambos paneles, no se llevó a cabo un análisis exhaustivo del esfuerzo que soportan las estructuras correspondientes que sostienen dichos paneles.

Figura 18

Estructuras y paneles fotovoltaicos diseñados en CAD SolidWorks



Nota: Fuente elaboración propia en software CAD SolidWorks

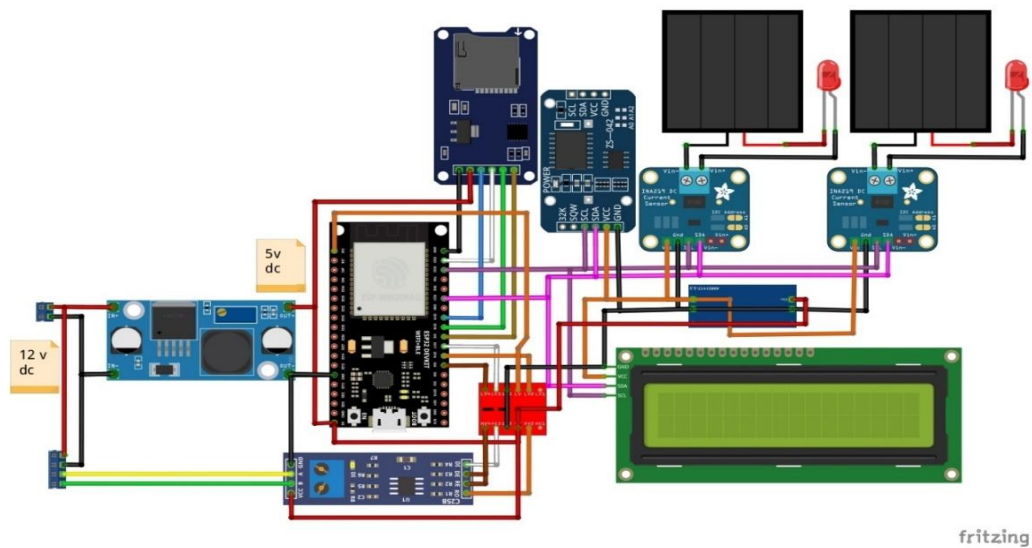
3.3.2. Diseño de los Circuitos Electrónicos.

Para diseñar el circuito electrónico se tenía definido los objetivos del proyecto, teniendo en cuenta que los sistemas fotovoltaicos estarían expuestos a la intemperie se utilizó un módulo MAX485 Conversor RS485 a Serial TTL, para enviar y recibir señales a largas distancias, con el fin de proteger el circuito principal de la lluvia y humedad.

El diseño se realizó en el software KiCAD 8.0, que te permite interactuar con los circuitos electrónicos, conectando las piezas de forma virtual para ver cómo se comportan y ver cuál de ellas sería conveniente adquirir, para mostrar el montaje con los artículos electrónicos se utilizó en software Fritzing.

Figura 19

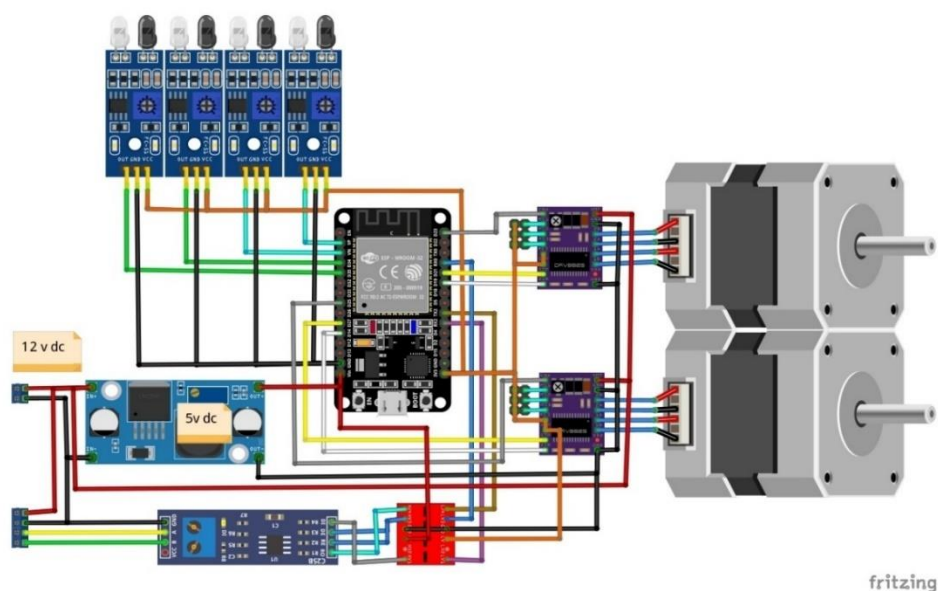
Circuito principal elaborado en software Fritzing



Nota: Fuente Elaboración Propia

Figura 20

Circuito secundario elaborado en software Fritzing



Nota: Estos circuitos se realizaron para demostrar las conexiones con los materiales electrónicos de las placas. La placa principal se encarga de mediar los parámetros de voltaje y corriente emitidos por los paneles fotovoltaicos y medidos por el sensor INA219, guarda los datos en la plataforma ThingSpeak, en la memoria y además se encarga calcular la posición

solar. La placa secundaria se encarga de recibir los datos de la posición solar y activar los motores para ajustar la posición del sistema con seguidor solar

3.3.3. Adquisición de Materiales Electrónicos.

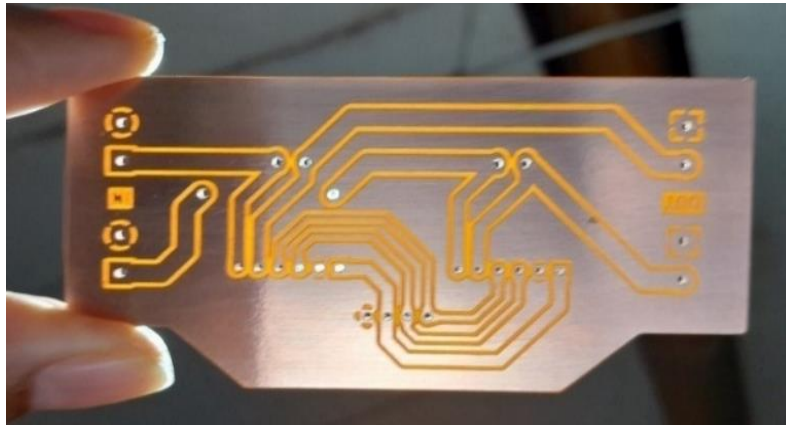
Se realizó en base al diseño de los circuitos electrónicos entre los principales como dos Tarjetas de Desarrollo ESP32, las cuales se utilizaron para gestionar diversas acciones de programación y automatización en los circuitos. Estas tarjetas fueron responsables del control en el funcionamiento del panel con seguidor solar. Para garantizar el adecuado rendimiento de los motores Stepper Nema 17, se incorporó un Driver PAP DRV8825, que proporciona protección contra sobrecargas al motor. Los sensores de voltaje y corriente INA 219 fueron utilizados para cuantificar tanto el voltaje como la corriente generada por cada panel en un intervalo de 30 segundos con el propósito de recopilar un amplio conjunto de datos. Es importante destacar que todos los materiales electrónicos mencionados estuvieron regulados por las Tarjetas de Desarrollo ESP32.

3.3.4. Diseño e Impresión de los Circuitos en la Placa PCB. (Printed Circuit Board)

El diseño del circuito en la placa PCB se realizó con el fin de mejorar el circuito, porque no se estaría utilizando Protoboard y cables de conexión, dándole seguridad y estabilidad al sistema electrónico. Para protegerlo de la humedad, polvo y corrosión se utilizó silicona en la base del circuito. De acuerdo a el diseño del circuito electrónico en el programa KidCad 8.0, se realizó el diseño para la impresión de la placa en los programas, Candle y FlatCam (versión gratuita), para realizar perforaciones y cortes de las placas, luego con la impresora CNC se imprimió el diseño en una baquelita.

Figura 21

Impresión de los circuitos en la placa PCB

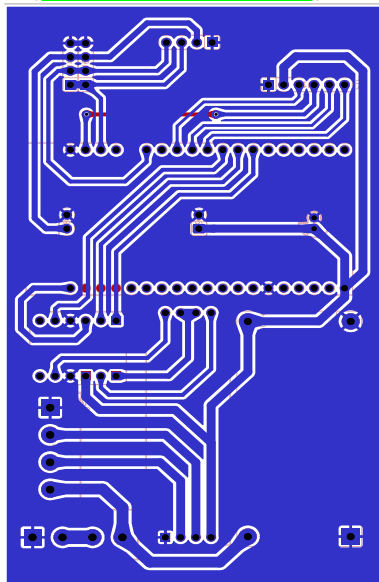
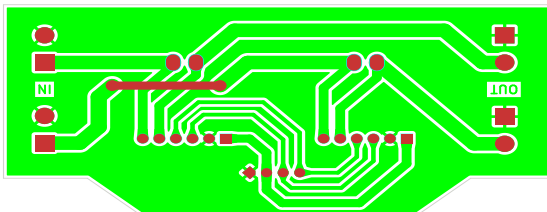


Nota: Fuente fotografía propia

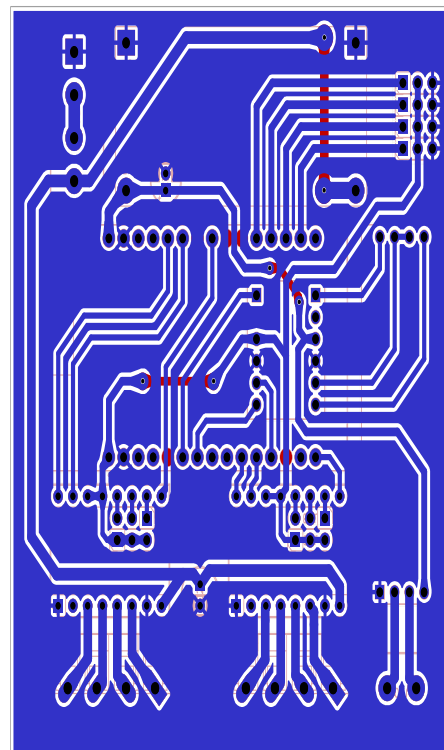
Figura 22

Placa de los circuitos

Placa principal



Placa secundaria



Nota: Se diseñó en el software KidCad 8.0 los circuitos para las placas electrónicas principal y secundaria, para luego imprimir estas placas en una placa electrónica PCB.

3.3.5. Implementación de los Circuitos con Materiales Electrónicos

Las dos placas impresas en baquelita tiene como base una lámina de cobre, la que forma las pistas conductoras que nos sirve para conectar los componentes electrónicos, un elemento esencial utilizado son las regletas de pines, las cuales han sido soldadas a la placa PCB, estas regletas nos sirven para la conectividad de las tarjetas de desarrollo ESP 32 y de los diferentes componentes electrónicos que poseen pines para su conexión, también se utilizó borneras como elemento de conexión en las placas PCB, las cuales nos ayudan a conectar de manera segura los cables de alimentación y de emisión y recepción de datos.

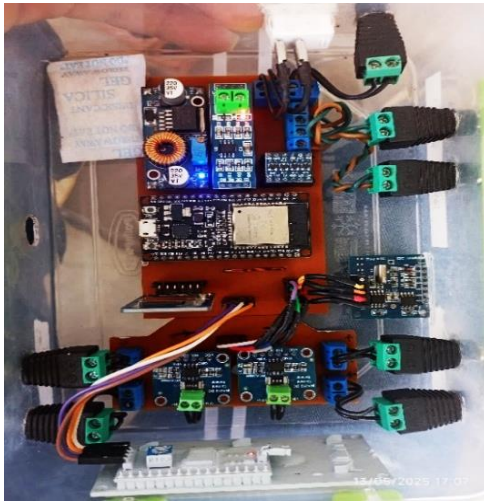
Cuando ya se completó el armado de las placas PCB con las regletas y las borneras, se procedió a instalar los componentes electrónicos en ambas placas. La primera placa la denominamos placa principal en la cual se instaló una tarjeta de desarrollo ESP32 , un convertidor de voltaje DC-DC STEP DOWN 5A XL 4005, el cual regula el voltaje para la alimentación de la tarjeta de desarrollo, también se instaló conversor RS485 para emisión y recepción de datos con la placa secundaria, otro componente instalado fue el RELOJ RTC DS1307+EEPROM AT24C32 el cual nos sirvió para programar los momentos exactos de movimiento del sistema de seguidor solar, también se instaló Módulo lector de memoria Micro SD CARD 74LVC125A, el cual nos sirvió como respaldo de almacenamiento de todos datos recopilados, otro componente instalado fue el SENSOR HIGH SIDE INA 219, el cual tuvo la fundamental función de tomar las lecturas de voltaje y corriente de ambos paneles y como últimos componentes instalados tenemos al CONVERTOR 4CH 5V/3.3V y al ADAPTADOR LCD A I2C-PCF8574 los cuales dieron funcionamiento a una pantalla LCD que nos mostró la fecha, hora, voltaje y corriente.

En la placa secundaria se instaló como componente principal una tarjeta de desarrollo ESP32, para la alimentación un convertidor de voltaje DC-DC STEP DOWN 5A XL 4005, un conversor RS485 que sirve para emisión y recepción de datos con la placa principal, luego como controlador de movimiento para los motores STEPPER NEMA se instaló dos DRIVER PAP DRV 8825 junto con su condensador de 1000 μ F, y como ultimo componente de la placa secundaria utilizamos modulo sensor LDR-3 PIN como final de carrera en el sistema del tornillo helicoidal.

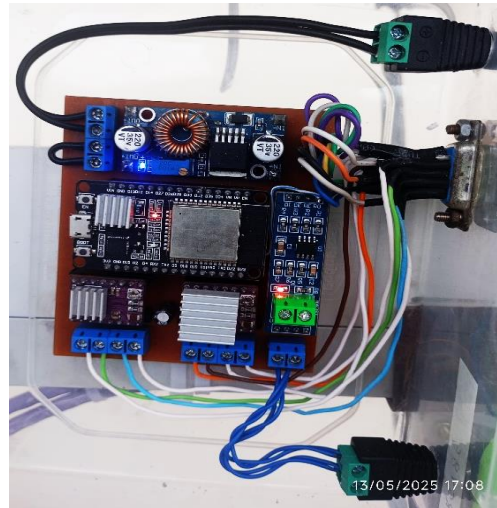
Figura 23

Implementación de los circuitos con materiales electrónicos

Placa principal



Placa secundaria



Nota: Fuente fotografías Propias

3.3.6. Programación y Adaptación del Código SPA (Solar Position Algorithm)

Una librería de programación es una colección de código desarrollado previamente que los programadores pueden utilizar para desarrollar software de manera más ágil, por lo tanto, se hizo uso de la librería SPA (Solar Position Algorithm) la cual está disponible en el software Arduino IDE. Esta librería es exclusiva para aplicaciones de radiación solar, al suministrarle la fecha y el tiempo, la librería nos responde con varios tipos de valores con respecto a la posición del sol, como el ángulo de azimuth desde amanecer y la posición del azimuth cada vez que se solicitó en intervalos de 30 segundos hasta el anoecer, el ángulo elevación al amanecer la posición de elevación cada vez que se solicitó también en intervalos de 30 segundos hasta el anoecer, todos estos datos son enviados a un recetor el cual también es programado para que cada ángulo que va aumentado tanto de azimuth como de elevación, se emite la condición para que el motor Stepper Nema gire 20 pasos por cada ángulo de azimuth adicional, y que gire 124 pasos por cada ángulo adicional de elevación. Otras librerías se utilizaron en el software Arduino y que fueron necesarias para el sistema:

- ✓ wifi.h librería para gestionar todas las funcionalidades del ESP32 y la red wifi para su conexión inalámbrica.
- ✓ secrets.h se utiliza para guardar información privada del código principal como nombres y contraseña para ingresar a la nube.

- ✓ thinkgSpeak.h permite la interacción del ESP32 con la tarjeta SD a travez de protocolos SPI.
- ✓ SPI.h permite facilitar la comunicación del dispositivo ESP32 con la tarjeta SD.
- ✓ Wire.h permite la comunicación mediante protocolo I2C (internet integrado por circuitos), utiliza dos líneas, SDA (datos) y SCL (reloj)
- ✓ RTSlid.h sirve para facilitar el manejo del reloj de tiempo real.
- ✓ accelStepper.h: esta librería sirve para controlar los motores paso a paso en el microcontrolador ESP32, permite acelerar y desacelerar, para obtener un manejo avanzado y preciso.
- ✓ adafruit_INA219.h: librería que sirve para controlar el sensor INA219 en conjunto con el Wire.h ya que ambos se comunican por el protocolo I2C
- ✓ freertos/task.h: librería que sirve para gestionar, crear y manipular tareas en tiempo real.
- ✓ esp_sleep.h: sirve para controlar los modos de bajo consumo energético del ESP32.
- ✓ math.h: sirve para realizar operaciones matemáticas complejas en lenguaje C++.

3.3.7. Implementación del Programa Para Almacenamiento de Datos de Medición

Para el almacenamiento de los datos obtenidos durante el periodo de prueba se utilizó el software ThingSpeak el cual permite que sensores, instrumentos y sitios web envíen datos a la nube, donde se almacenan en canales privados o públicos. ThingSpeak almacena datos en canales privados por defecto en este caso hemos utilizado como respaldo de almacenamiento una memoria SD a través del módulo lector de memoria Micro SD Card 74LVC125A, pero los canales públicos se pueden usar para compartir datos con otros, Thinkspeak también nos permitió monitorear los datos a través de su aplicación móvil ThingShow, que brinda visualización en tiempo real las mediciones como también muestra un análisis de gráficos. En el apartado de anexo se muestran el código correspondiente para cada función.

3.4. OE3. Manufactura de los Paneles Fotovoltaicos

3.4.1. Estructura del Panel con Seguidor Solar

Para la estructura del sistema con seguidor solar se utilizaron materiales nuevos y de segunda mano que fueron descartados por las carpinterías metálicas. Los cuales se adaptaron de acuerdo con el modelo diseñado en el programa de SolidWorks, y se llevó a cabo su construcción en forma física.

Figura 24

Construcción de la estructura del sistema con seguidor solar.



Nota: Fuente fotografías Propias

La base está compuesta por dos tubos rectangulares galvanizado de 300x60x40x2 mm, separados por una distancia de 17.6 cm y como cruceta central se usó un tubo rectangular galvanizado de 285x100x50x2 mm soldado a los tubos de base, en el centro de la cruceta se realizó un agujero que traspaso los dos lados del tubo rectangular con un diámetro de 20 mm, para instalar dos chumaceras tipo rombo de 3/4'' en la parte inferior como en la parte superior de la cruceta, luego se insertó una varilla circular que sirvió como eje principal de la estructura para que tenga doble superficie de agarre lo que garantiza que no se balance y tenga mayor soporte.

Figura 25

Base de la estructura del panel con seguidor solar



Nota: Fuente fotografía Propia

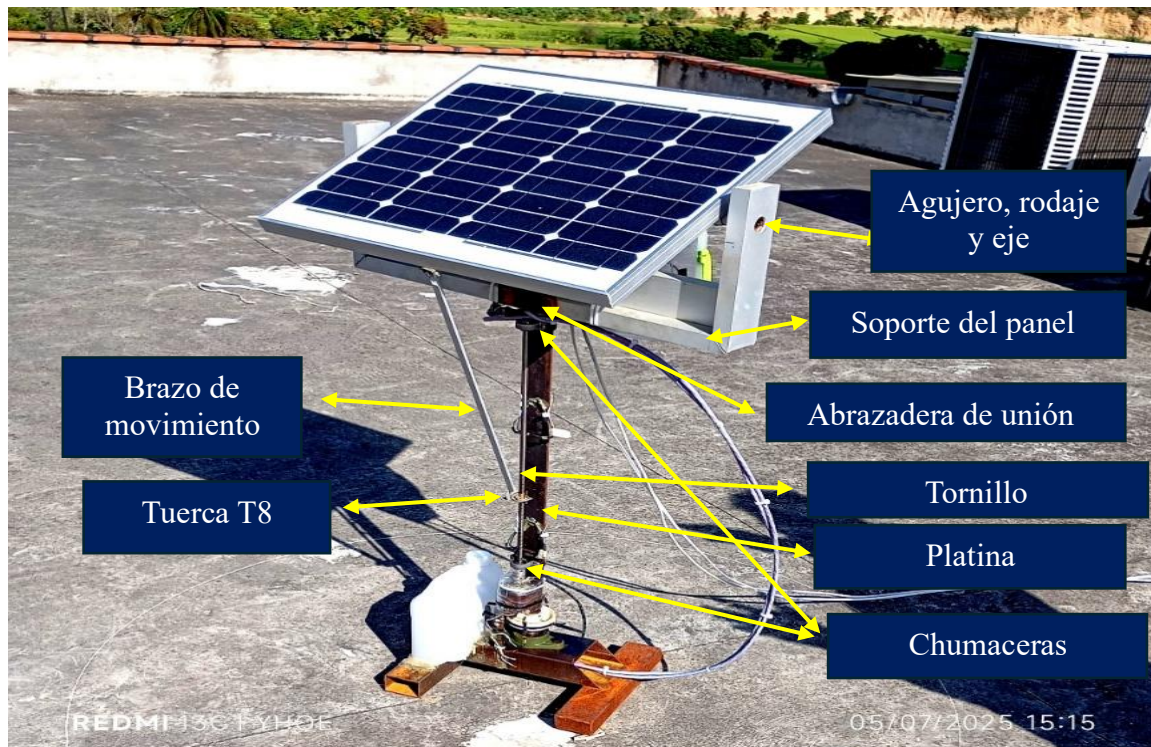
Las chumaceras garantizan que la estructura gire de manera suave sobre su propio eje, el cual tiene una longitud de 825mm y un diámetro de 3/4", desde la cruceta separó una distancia de 235 mm para soldar una platina de 590x50x3mm sobre el eje, donde se instalaron dos chumaceras de 8 mm de diámetro para soporte del tornillo trapezoidal de 500 mm de largo por 8 mm de diámetro con 4 hilos de carrera y su tuerca T8 que avanza 8mm por vuelta.

Luego se realizó una abrazadera de fierro galvanizado con dimensiones de 70 mm largo, 54 mm de ancho, 25 mm de alto y 2 mm de espesor, que sirvió de unión entre el soporte del panel fotovoltaico y la estructura que da movimiento al seguidor solar a través de pernos, tuercas y arandelas. De acuerdo al diseño se realizó una estructura en forma de U (ver figura 26) con una base de tubo rectangular de aluminio de 600x45x25x2 mm, el cual se unió en ambas esquinas dos tubos rectangulares de 161.5x45x25x2 mm, en la parte superior se les realizó agujeros en ambas caras de los tubos rectangulares para insertar dos rodajes de 32 $\varnothing$ exterior x 15 $\varnothing$ interior x 9 mm en cada uno de ellos, luego se ancló un tubo circular 600x18.5x1.8mm, que servirá como eje de movimiento y de soporte del panel fotovoltaico.

Para dar movimiento a la estructura del seguidor solar se utilizó dos motores nema 17, tanto para el movimiento horizontal (Acimut), como vertical (elevación).

Figura 26

Estructura y panel fotovoltaicos del mecanismo con seguidor solar



Nota: Fuente fotografía Propia

3.4.2. Mecanismo del Movimiento de Acimut

En el mecanismo de movimiento horizontal, el motor está estacionado sobre la base de la cruceta, fijo con una abrazadera hecha de aluminio que se sujetó con 4 pernos, arandelas y tuercas respectivamente. En el eje del motor se instaló una polea pequeña y a esa misma altura se fijó una polea grande en el eje principal de la estructura, uniendo las poleas con una faja dentada para dar mayor agarre y fricción al momento que el motor de movimiento bruscos o por condiciones ambientales el viento quisiera girar el mecanismo, una vez instalado los componentes la estructura tendrá movimiento horizontal de forma suave y controlada. Cabe mencionar que las poleas y faja son piezas usadas de una máquina de coser.

Figura 27

Mecanismo de movimiento acimut para la estructura con seguidor solar



Nota: fotografía propia

3.4.3. Mecanismo del Movimiento de Elevación.

Respecto al movimiento de elevación el motor esta estacionado sobre una tarima echa de fiero galvanizado y soldado a la platina sobre el eje principal de la estructura el cual encaja de forma precisa, se usó un acoplador para unir el eje del motor con el tornillo trapezoidal, que contiene una tuerca T8 que baja y sube si el motor gira en sentido antihorario o horario respectivamente. Para que este movimiento de subir y bajar se refleje en el panel fotovoltaico se usó un brazo de aluminio tipo L 465X10X10mm, que se unió con un perno en la tuerca T8 y con una bisagra sobre la base del perímetro central del panel, dándole libertad de movimiento en ambas uniones.

Figura 28

Mecanismo de movimiento de elevación, estructura con seguidor solar



Nota: Fuente fotografía propia

3.4.4. Estructura para el Panel Fotovoltaico Fijo

Para la estructura fija se utilizó perfiles de aluminio tipo L de 2.5x2.5x2mm en forma de triángulo con una inclinación de 15° unido por pernos, tuercas y arandelas. Se fijó el panel en la estructura con el grado de inclinación ya mencionado con el fin de tener una mayor captación de energía solar durante todas las estaciones del año. En la parte de anexos, se detalla los planos para la estructura fija.

Figura 29

Estructura del panel fotovoltaico fijo



Nota: fotografía propia

3.4.5. Ubicación de los Paneles Fotovoltaicos fijo y de seguidor solar.

Los paneles fotovoltaicos implementados han sido ubicados en la azotea del pabellón de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, en el campus

universitario, libre de sombras aledañas que puedan reducir la captación o incidencia de la radiación solar (Figura 24). Los sistemas fotovoltaicos tienen la siguiente ubicación geográfica: Latitud 5°40'33.51" S, Longitud 78°46'40.26" O y una elevación de 645 m.s.n.m.

Figura 30

Ubicación de los sistemas fotovoltaicos



Nota: Fuente fotografía propia

3.4.6. Inclinação y Orientación del Panel Fotovoltaico Fijo.

Para la instalación del panel fijo se determina su orientación y ángulo óptimo de inclinación, en la ecuación 1 se calcula el ángulo de inclinación para una latitud de 5.67.

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0.69 \times |\varphi|)$$

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0.69 \times 5.67)$$

$$\beta_{opt} = 7.6$$

Donde:

β_{opt} = Angulo óptimo de inclinación

$|\varphi|$ = Latitud

El ángulo optimo de inclinación calculado es de 7.6 °, dicho ángulo indica la inclinación que debe tener el panel fotovoltaico para tener una mayor captación de energía solar durante el día. Sin embargo, esta inclinación está por debajo del reglamento técnico “resolución directoral de especificaciones técnicas y procedimientos de evaluación del sistema fotovoltaico y sus componentes para electrificación rural N.º 003-2007-EM/DGE”, donde indica que la mínima inclinación debe de ser de 10 ° para una latitud igual o menor a 5°, además debe tener una

separación de 5 cm del techo. Autosolar Perú recomienda una inclinación de 15° para latitudes de 0° a 15° , con el fin de obtener una eficiente radiación solar durante todo el año.

De acuerdo con las referencias mencionadas se determinó que el panel fotovoltaico fijo se instalara a una inclinación de 15° y con una separación de 5 cm del techo. Para la orientación según la norma EM.080 Instalaciones con energía solar, se debe orientar hacia el norte verdadero, ya que estamos ubicados en el hemisferio sur bajo la línea ecuatorial.

Figura 31

Instalación y orientación del sistema fotovoltaico fijo



Nota: Para la instalación del panel fotovoltaico fijo se realizó un círculo en el techo para que con ayuda de una brújula buscar el norte verdadero y trazar una línea de norte a sur que pase por el centro de la circunferencia, esto con el fin de usarlo de referencia para su instalación.

3.4.7. Instalación del Panel Fotovoltaico con Seguidor Solar

Para posicionar el panel con seguidor solar se tuvo en cuenta los ángulos de salida y puesta del sol como referencia para comparar que la programación funcione a los cálculos de posición solar, ya que el sistema cuenta con finales de carrera para trayectorias máximas de acimut y elevación con el fin de proteger el mecanismo. Durante los 25 días de recolección de datos, se obtuvo valores entre (70.54° a 67.85° noreste) y (289.57° a 292.78° noroeste), respectivamente. Estos datos fueron tomados de la página Sun Earth Tools, ver tabla 3.

El final de carrera para acimut permite un recorrido de 180° iniciando en (80° noreste y 260° noroeste), cuando llega a su fin regresa a su posición de origen y busca el ángulo de salida del sol. Para la elevación el recorrido que permite el final de carrera es de 90° iniciando

desde (0° a 90°). Estos finales de carrera protegen el mecanismo y los circuitos electrónicos en caso de averías del sistema por manipulación de los circuitos, código oh por error de conexión.

Tabla 3

Posición angular de salida y puesta del sol

Fecha	Salida de sol	Puesta de sol	Acimut salida sol (N-E)	Acimut puesta de sol (N-O)
17/05/2025	06:15:55	18:06:58	70.54°	289.57°
22/05/2025	06:16:39	18:06:50	69.5°	290.6°
27/05/2025	06:17:32	18:06:58	68.6°	291.49°
1/06/2025	06:18:33	18:07:22	67.85°	292.21°
6/06/2025	06:19:40	18:07:59	67.27°	292.78°
11/06/2025	06:20:49	18:08:48	66.85°	293.18°

Nota: Estos datos fueron tomados en la azotea del edificio de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén. Fuente: Sun Earth Tools.

Se puede calcular la posición solar en plataformas online, usando coordenadas, fecha y hora, esto entrega acimut y elevación. Una de estas plataformas es el Sun Earth Tools. Para cálculos manuales se utiliza ecuaciones astronómicas que se detallan a continuación:

Declinación solar (δ)

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right) * (d_n - 284)\right)$$

Donde:

d_n = es el número del día en el año

Ecuación del ángulo diario (Γ)

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365} (d_n - 1)$$

Ecuación de corrección del tiempo (E_t)

$$E_t = 0.00007 + 0.001868 \cos(\Gamma) + 0.032077 \sin(\Gamma) - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma) \quad (229.18)$$

Hora solar local (**HSL**)

$$HSL = Hora\ civil + \frac{4 \times (L_{ref} - L)}{60} + E$$

Donde:

L_{ref} = longitud del meridiano central de la zona horaria

L = longitud

E = corrección por ecuación del tiempo en hora, se puede obtener de tablas

$Hora\ civil$ = hora local real

Cálculo de ángulo horario (**H**)

$$H = 15^\circ \times (HSL - 12)$$

Cálculo de elevación solar (**α**)

$$\sin(\alpha) = \sin(\delta) \times \sin(\phi) + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(H)$$

$$\alpha = \arcsin(\sin(\alpha))$$

Cálculo de acimut solar (**Ψ**)

$$\cos(\Psi) = \frac{\sin(\delta) - \sin(\alpha) \times \sin(\phi)}{\cos(\alpha) \times \cos(\phi)}$$

Si (**H**) > 0 (tarde)

$$\Psi = 360^\circ - \arccos(\cos(\Psi))$$

Si (**H**) < 0 (mañana)

$$\Psi = \arccos(\cos(\Psi))$$

Figura 32

Instalación del Panel fotovoltaico con seguidor solar



Nota: Fuente Elaboración Propia

3.5. OE4: Medición y Evaluación de parámetros eléctricos obtenidos para determinar la eficiencia energética de cada panel fotovoltaico.

Se realizó las mediciones de los datos correspondientes al voltaje y corriente. Al aplicar la ley de Watt, establece que la potencia eléctrica se calcula mediante la fórmula $P=V \times I$, se puede determinar así la cantidad de potencia eléctrica (P) que es generada por los paneles fotovoltaicos, tanto aquellos que utilizan un seguidor solar como los que son de tipo estacionario. En el transcurso de esta investigación, se llevaron a cabo diversas mediciones de parámetros eléctricos a lo largo de un periodo de 25 días, para ello se tomó en cuenta condiciones ambientales y climáticas a lo que estuvo sometido los sistemas fotovoltaicos. El propósito principal de estos esfuerzos fue evaluar de manera precisa la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en respuesta a dichas variaciones.

3.5.1. Generación Energética de los Paneles Fotovoltaicos

Después de hacer el análisis de los factores climáticos y atmosféricos, así como de la irradiancia solar y la disponibilidad de horas pico solar (HPS), se realizó la evaluación de la conversión o transformación de la energía solar en energía eléctrica en 25 días para ambos tipos de paneles solares fotovoltaicos.

Las planillas fueron trabajadas en el software Excel, considerando las columnas que presentaban valores de potencia generada por las mediciones de voltaje y corriente obtenidos por los sensores INA 219 de cada uno de los paneles, los cuales eran adquiridas por el sistema informático cada 30 segundos aproximadamente.

Tabla 4*Potencia diaria de los sistemas fotovoltaicos Pss y Psf*

FECHA (2025)	Prom P(w). Pss	Prom P(w). Psf	Diferencia %
17-May	8.1425	6.8085	19.59%
18-May	9.0368	7.4694	20.98%
19-May	6.8482	5.4492	25.67%
20-May	5.7326	4.6249	23.95%
21-May	7.7508	6.4559	20.06%
22-May	7.8057	6.3368	23.18%
23-May	7.3721	5.9699	23.49%
24-May	7.8927	6.5304	20.86%
25-May	7.4956	6.1930	21.03%
26-May	7.4540	5.9673	24.91%
27-May	7.0774	5.8551	20.88%
28-May	6.8395	5.6739	20.54%
30-May	7.7366	6.4232	20.45%
31-May	8.7459	7.3108	19.63%
1-Jun	7.6646	6.2599	22.44%
2-Jun	9.4299	7.8272	20.48%
3-Jun	9.4549	7.8170	20.95%
4-Jun	7.9967	6.6435	20.37%
5-Jun	7.6121	6.2746	21.32%
6-Jun	5.7651	4.6561	23.82%
7-Jun	7.0856	5.6861	24.61%
8-Jun	7.9910	6.5385	22.22%
9-Jun	7.2803	5.9485	22.39%
10-Jun	7.9590	6.4720	22.98%
11-Jun	6.9669	5.7993	20.13%
Total, general	7.6475	6.2816	21.74%

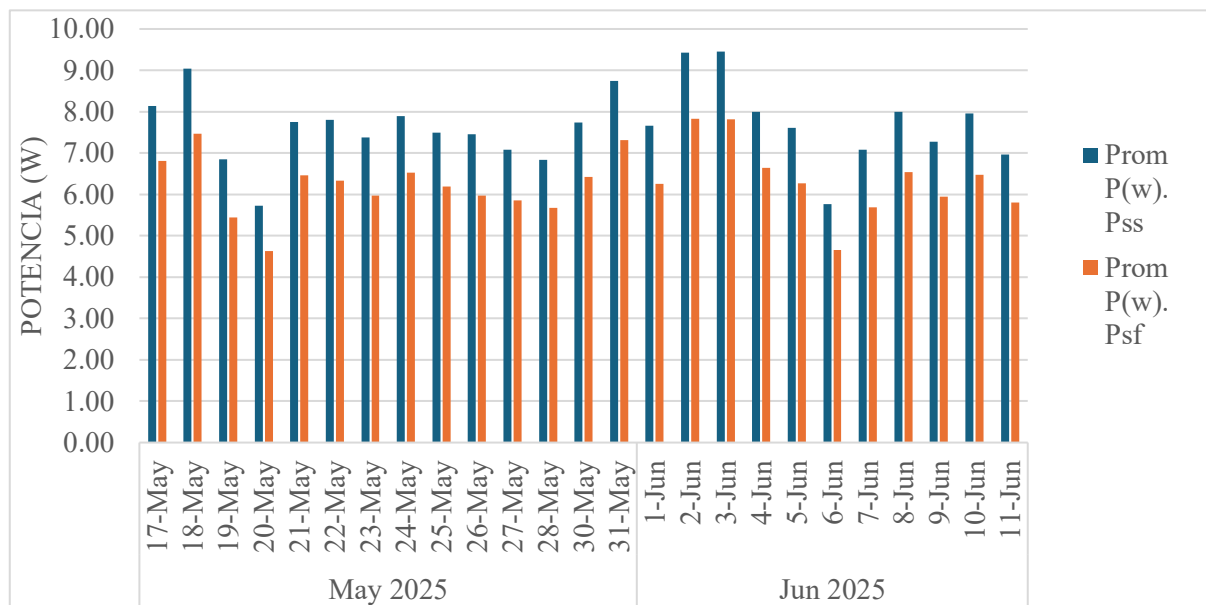
Nota: En la tabla se presentan los resultados obtenidos durante un periodo de medición de 25 días sobre la eficiencia energética de un panel con sistema fotovoltaico fijo (Psf) comparado con uno dotado de un sistema de seguimiento solar (Pss). Los datos, expresados en promedio de potencia generada diaria, revelan una diferencia significativa a favor del sistema con seguidor solar.

Durante todo el periodo de evaluación (del 17 de mayo al 11 de junio de 2025) se evidenció de manera constante una mayor generación de potencia por parte del sistema con seguidor solar (Pss) respecto al panel estático (Psf), se observa que el sistema con seguidor solar alcanzó un promedio general de potencia diaria de **7.6475 W**, mientras que el sistema fijo

produjo **6.2816 W**, resultando en una diferencia porcentual promedio del **21.74%** a favor del seguidor. Esta diferencia indica una ganancia energética considerable, atribuida a la capacidad del seguidor solar de optimizar la captación de irradiancia al alinear constantemente el panel con la posición del sol.

Figura 33

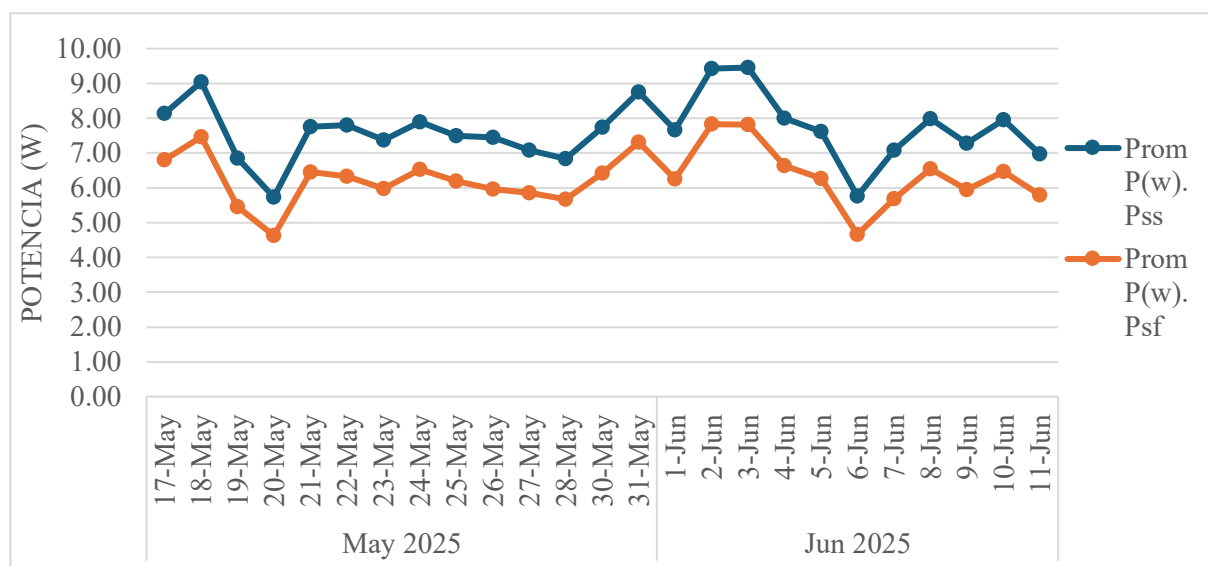
Promedio de potencia diaria del sistema Pss y Ps



Nota: Fuente Elaboración Propia

Figura 34

Línea de tendencia de la energía generada (W) de los sistemas Pss y Psf



Nota: las figuras 33 y 34 muestran la comparación de eficiencia energética de los sistemas Pss y Psf, durante el periodo de prueba. Fuente elaboración propia en el software Excel.

3.5.2. Relación de Radiación y Eficiencia Energética de los Paneles Pss y Psf

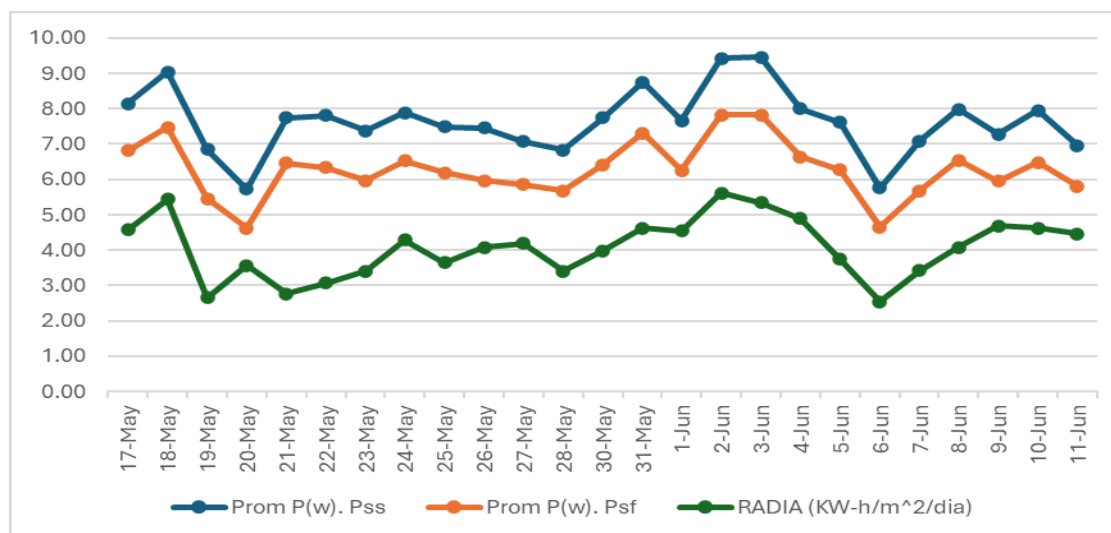
Los datos de radiación (ALLSKY_SFC_SW_DWN. All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance _kW-h/m²/day), obtenidos de la página web NASA POWER, indican cuanta energía solar llega a la superficie terrestre considerando las nubes y polvo de la atmósfera.

Estos niveles son comparables a los identificados en las selvas altas y resultan favorables para la generación de energía solar, especialmente a través de la utilización de módulos fotovoltaicos. La irradiancia diaria promedio anual se estima en aproximadamente 6 kWh/m²/día, cifra que resulta comparable a la media diaria global registrada en regiones tropicales que carecen de obstrucciones. Se formula que, durante el transcurso del año, la provincia de Jaén presenta una elevada irradiancia. Este fenómeno favorece la planificación de instalaciones solares a través de estimaciones de producción coherentes.

Teniendo en cuenta que la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, y en este proyecto, a la superficie de los paneles, es la energía que se midió en los sistemas fotovoltaicos empleados, los cuales se encargaron de captar la radiación solar y convertirlo en energía eléctrica. En la siguiente figura se muestra la relación que existe entre radiación solar y la eficiencia energética de ambos sistemas fotovoltaicos.

Figura 35

Relación Radiación/eficiencia energética de los sistemas Pss y Psf



Nota: Elaboración Propia

3.5.3. Comportamiento de la Temperatura Interna en las Celdas del Panel Solar

Monocrystalino 30W SY-30M

En condiciones operativas normales, la temperatura interna de las celdas del panel solar presenta un aumento significativo en comparación con la temperatura ambiental. Este fenómeno se atribuye a la capacidad de las celdas fotovoltaicas para absorber la radiación útil destinada a la generación de electricidad, como el calor, lo que resulta en un aumento de su temperatura interna.

Se estima que la temperatura interna de las celdas puede exceder la temperatura ambiente en un rango de 20 °C a 30 °C. Este aumento de temperatura se inicia en las primeras horas de la mañana, alcanzando su máximo alrededor de las 12:00 p.m. Y a las 14:00 horas, momento en el cual la irradiancia solar alcanza igualmente su nivel máximo. El incremento de la temperatura influye en la eficiencia del panel fotovoltaico. Por cada grado Celsius adicional sobre la referencia estándar de 25 °C, se observa una ligera disminución en la eficiencia del panel, estimada en aproximadamente un 0.45% por grado Celsius, de acuerdo con el coeficiente de temperatura característico de los paneles monocrystalinos. En los meses de mayo y junio según Atlas Solar del Perú, el incremento de temperatura interna del panel solar puede ser de 44 y 42 °C aproximadamente.

Para calcular la temperatura de operación de cada celda fotovoltaica y su potencia real del panel fotovoltaico se debe tener las especificaciones técnicas del panel a calcular y se utiliza las siguientes ecuaciones.

Tabla 5

Especificaciones Técnicas y dimensiones

Panel monocristalino SY – 30M	
Marca	Opalux
Modelo	SY-30M
Potencia máxima nominal (Pmax)	30 W
Tolerancia de salida	±3%
Voltaje al Pmp (Vmp)	17.2 V
Corriente al Pmp (Imp)	1.75 A
Voltaje de circuito abierto	21.6 V
Corriente de corto circuito	1.92 A
Voltaje máximo del sistema	1000 V
Temperatura Nominal de Operación de la Celda	±45 °C
Eficiencia	18.43%
Coeficiente de temperatura de (Pmax)	-0.41%/°C
Coeficiente de temperatura de (Voc)	-0.31% /°C
Coeficiente de temperatura (Isc)	+0.05%/°C
Temperatura de célula (TC)	25 °C
Irradiación (E)	1000 W/m ²
Dimensiones (mm)	450*540*25

Nota: Elaboración Propia

Para calcular la Temperatura de Celda Fotovoltaica se utiliza la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que si la temperatura sobrepasa los 25°C disminuye la tensión y aumenta la corriente, y si a temperatura baja sobre los 25 °C aumenta la tensión, pero la corriente disminuye levemente. Para el caso de radiación la corriente y tensión aumentan o disminuyen en función de la radiación solar.

Temperatura de operación de la celda fotovoltaica (T_{celda}).

$$T_{celda} = T_{ambiente} + E \times \frac{NOCT - 20\text{ }^{\circ}\text{C}}{800\text{ W/m}^2}$$

Donde:

$T_{ambiente}$ = Temperatura maxima del proyeto $^{\circ}\text{C}$

E = irradiacion para (1000 W/m^2)

$NOCT$ = Temperatura de operación nominal del panel fotovoltaico $^{\circ}\text{C}$

Remplazando se tiene:

$$T_{celda} = 30.09\text{ }^{\circ}\text{C} + 1000\text{ W/m}^2 \times \frac{45\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}}{800\text{ W/m}^2}$$

$$T_{celda} = 61.34\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Factor o Coeficiente total de la potencia del panel fotovoltaico (F_{pmp})

$$F_{pmp} = 1 + \left[(T_{celda} - 25^{\circ}\text{C}) \times \left(\frac{TKPmp}{100} \right) \right]$$

Donde:

$TKPmp$ = coeficiente de corrección de la potencia por temperatura

Nota: La temperatura de operación nominal ($NOCT$) y el coeficiente de corrección de la potencia de temperatura ($TKPmp$) del panel fotovoltaico, se detallan en sus especificaciones técnicas.

$$F_{pmp} = 1 + \left[(61.34\text{ }^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \times \left(\frac{-0.41\%/^{\circ}\text{C}}{100} \right) \right]$$

$$F_{pmp} = 0.85$$

Determinar la Potencia Real del Panel Fotovoltaico

$$Pmp_{corregido} = Pmp \times F_{pmp}$$

Donde:

Pmp = potencia máxima

$$Pmp_{corregido} = potencia\ máxima\ corregida$$

$$Pmp_{corregido} = 30\ W \times 0.85$$

$$Pmp_{corregido} = 25.5\ W$$

3.5.4. Días con Mayor Diferencia Porcentual de la Comparación Energética.

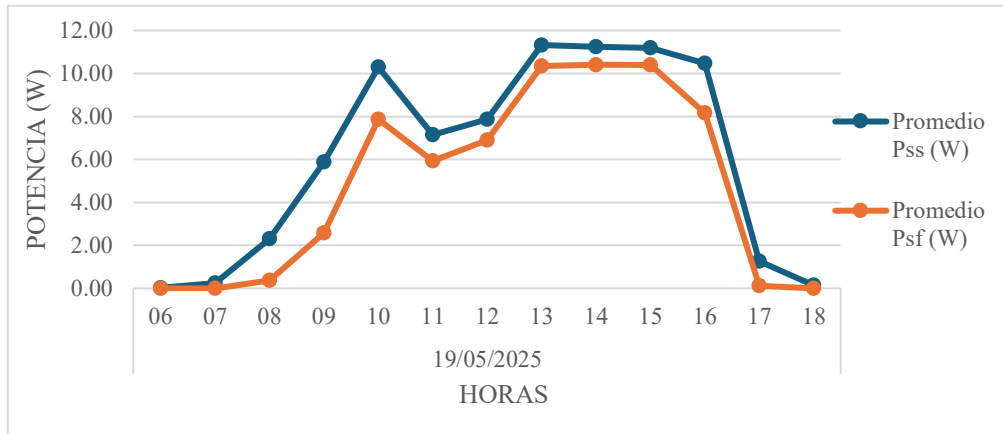
En días como el 19/05/2025 con 25.67%, el 26/05/2025 con 24.91%, y el 07/06/2025 con 24.61%, se registraron los incrementos porcentuales más altos, lo que puede asociarse a condiciones atmosféricas variables donde el seguidor maximiza mejor el aprovechamiento del recurso solar, en estos días el cielo estuvo mayormente nublado y con presencia de lluvias parciales lo que generó que el sistema con seguidor solar capte más radiación respecto al sistema fijo y esto se refleja en la conversión de energía ya que la diferencia porcentual de comparación energética es mayor respecto a los demás días de medición pero su captación energética es relativamente menor.

En todos los días evaluados, el sistema con seguidor superó al sistema fijo, lo que demuestra una ventaja energética clara y consistente. Este resultado valida la eficacia de implementar tecnologías de seguimiento solar para maximizar la captación de energía fotovoltaica, especialmente en zonas con alta irradiación solar como Jaén, Cajamarca.

La Figura 36 presenta el Promedio de Potencia (w) para la fecha 19/05/2025, donde se muestra el comportamiento de la potencia por hora de los sistemas Pss y Psf, a lo largo de las “horas del día”, desde las 06:00 hasta las 18:00 horas. Los dos conjuntos de datos de potencia siguen un patrón diurno, comenzando bajas en la mañana, aumentando durante las horas centrales del día y disminuyendo hacia la tarde. Se observa más variabilidad en las curvas de potencia alrededor del mediodía, la consecuencia de ese descenso se originó por las intensas lluvias y nubes que bloquearon la captación de radiación solar, afectando a ambos sistemas fotovoltaicos pero que a causa de esas condiciones climáticas el sistema con seguidor solar obtuvo mayor captación de energía ya que este sistema se mantiene perpendicularmente en dirección del sol, generando mayor captación de radiación solar directa y difusa, respecto al sistema fijo, baja considerablemente ya que la radiación directa y difusa llega en menor cantidad y esto se refleja en la conversión de energía.

Figura 36

Promedio de potencia de los sistemas Pss y Psf del día 19/05/2025



Nota: Elaboración Propia

En el gráfico se puede observar el siguiente comportamiento:

- ✓ **Inicio de actividad:** Ambas comienzan a activarse después de las 06:00, con Pss mostrando un ascenso ligeramente más rápido en las primeras horas de la mañana (08:00-09:00).
- ✓ **Comportamiento de doble pico:** Ambas curvas presentan un patrón de “doble pico” en este día, con un descenso entre el primer pico (alrededor de las 10:00) y el segundo pico (alrededor de las 13:00-14:00).
- ✓ **Magnitud de los picos:** Pss alcanza picos de potencia más altos (alrededor de 10.5 W y 11.5 W) que Psf (alrededor de 8 W y 10.5 W).
- ✓ **Diferencia de potencia:** Pss generalmente mantiene una potencia más alta que Psf durante la mayor parte del día, especialmente durante los periodos de pico. La brecha se acorta un poco durante el “valle” del mediodía (10:00-11:00).
- ✓ **Descenso vespertino:** Ambas potencias caen abruptamente al final del día. Psf parece “apagarse” un poco antes (cerca de las 17:00) en comparación con Pss, que aún tiene una pequeña lectura.

En resumen, el gráfico de la Figura 39 del 19/05/2025 muestra un comportamiento de potencia para Pss y Psf que, si bien sigue un patrón diurno general, exhibe una característica de “doble pico” con un descenso de potencia al mediodía, lo cual indica una condición de nubosidad y fuertes lluvias al derredor de las 11 am.

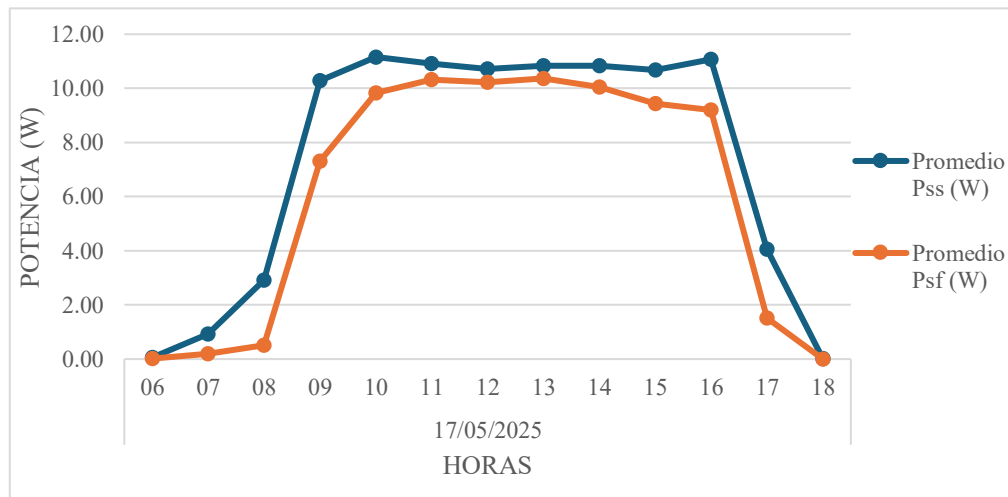
3.5.5. Días con Menor Diferencia Porcentual de la Comparación Energética.

En contraste, los días con menor diferencia porcentual, como el 17/05/2025 con 19.59%, el 21/05/2025 con 20.06% y el 31/05/2025 con 19.63%, muestran que, aunque el aporte adicional sigue siendo positivo, la ventaja fue menos pronunciada, esto se debe a que el cielo estuvo mayormente despejado con presencia de nubes parciales, por lo cual la radiación llega en mayor cantidad para ambos sistemas es por ello que la diferencia porcentual energética es menor pero la producción de energía es una de las mayores.

La figura 37 ilustra la relación entre el ‘promedio de potencia (W)’ por hora de los dos sistemas fotovoltaicos Pss y Psf, donde se muestra la eficiencia energética para el día 17 de mayo del presente año, con un patrón típico de generación de energía durante el día, comenzando bajas en la mañana, alcanzando un pico durante las horas centrales del día y disminuyendo hacia la tarde. En el gráfico se puede observar el siguiente comportamiento:

Figura 37

Promedio de potencia de los sistemas Pss y Psf del día 17/05/2025



Nota: Elaboración Propia

- ✓ **Valores iniciales:** Pss muestra un inicio ligeramente más rápido y con mayor potencia que Psf en las primeras horas de la mañana (06:00 - 08:00).
- ✓ **Pico de potencia:** Pss alcanza un pico de potencia más alto y lo mantiene por más tiempo (entre 09:00 y 16:00) en comparación con Psf, cuyo pico es ligeramente menor y su fase de alta potencia es más corta (entre 09:00 y 15:00).

- ✓ **Diferencia de potencia:** durante las horas centrales del día (aproximadamente 09:00 a 16:00), Pss consistentemente tiene un promedio de potencia mayor que Psf. La mayor diferencia se observa entre las 09:00 y las 10:00, y de nuevo entre las 15:00 y las 16:00.
- ✓ **Comportamiento al final del día:** ambas potencias disminuyen a cero alrededor de las 18:00, pero Pss mantiene una potencia mayor hasta más tarde (17:00) en comparación con Psf.

En resumen, el gráfico ilustra cómo la potencia promedio de los dos paneles varía a lo largo de un día. Pss muestra un rendimiento de potencia generalmente superior y más sostenido durante las horas pico en comparación con Psf. Una de las causas de menor diferencia porcentual se debe a la óptima captación de energía solar de ambos sistemas, esto indica que la radiación a llegado en mayor tiempo de forma directa a las celdas fotovoltaicas, confirmando acorde con las horas solar pico para este día, que se estimó unas 4.58 horas aproximadamente, lo que se ve reflejado en el gráfico.

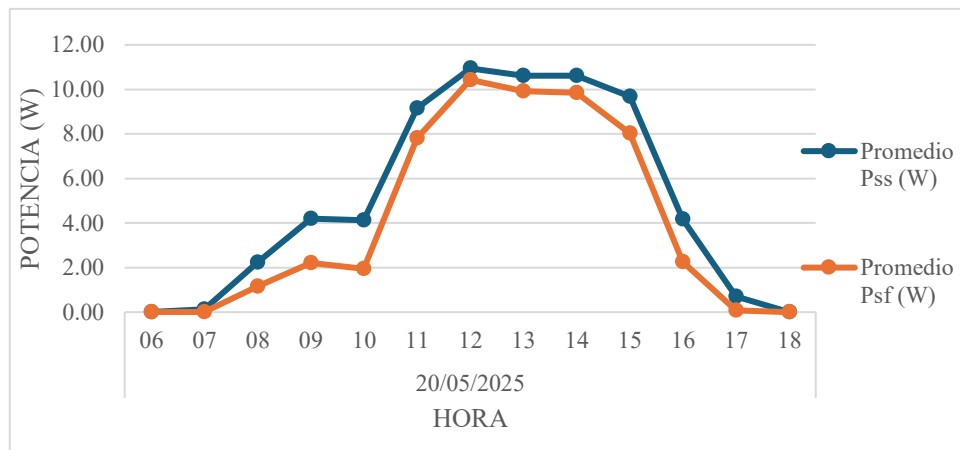
3.5.6. Valor más Bajo de Potencia Eléctrica Producida en los 25 Días del Periodo de Pruebas.

Al realizar una comparación entre todos los promedios de potencia eléctrica obtenida por día del panel con sistema de seguidor solar con el panel fijo, observamos que el promedio más bajo se registró el día 20 de mayo del 2025.

Este descenso en la potencia generada se atribuye a las condiciones climáticas de ese día, en el cual la temperatura máxima alcanzó los 27.94 °C y la mínima fue de 17.28 °C. Estas temperaturas relativamente bajas, en comparación con otros días del periodo de prueba, pudieron haber reducido la radiación solar disponible por fluctuaciones climáticas, en consecuencia, afecta negativamente la producción energética de ambos paneles.

Figura 38

Grafica de la potencia por hora del día con la menor producción energética



Nota: Fuente Elaboración Propia

Como se muestra en el figura 38, de 9 am a 10 am la captación de energía se detuvo incluso bajo un poco respeto al crecimiento de las 9 am, esto se debe a presencias de nubes que obstaculizaron la radiación solar. La grafica presente un exponencial crecimiento de 11 a 12, siendo el mediodía su punto máximo y de 13 a las 14 horas tubo con un pequeño descenso, que se incrementó a las 15 horas, para luego caer en picada a las 16 y 18 horas, en resumen, el día 20 de mayo se tuvo poca captación de radiación que a su vez se ve reflejado en la conversión de energía eléctrica que entregan las celdas fotovoltaicas. A pesar que HSP para este día es de 3.57 aproximadamente, por condiciones ambientales este día obtuvo uno de los valores más bajos de potencia de ambos sistemas.

3.5.7. Valor más Alto de Potencia Eléctrica Producida en los 25 Días del Periodo de Pruebas.

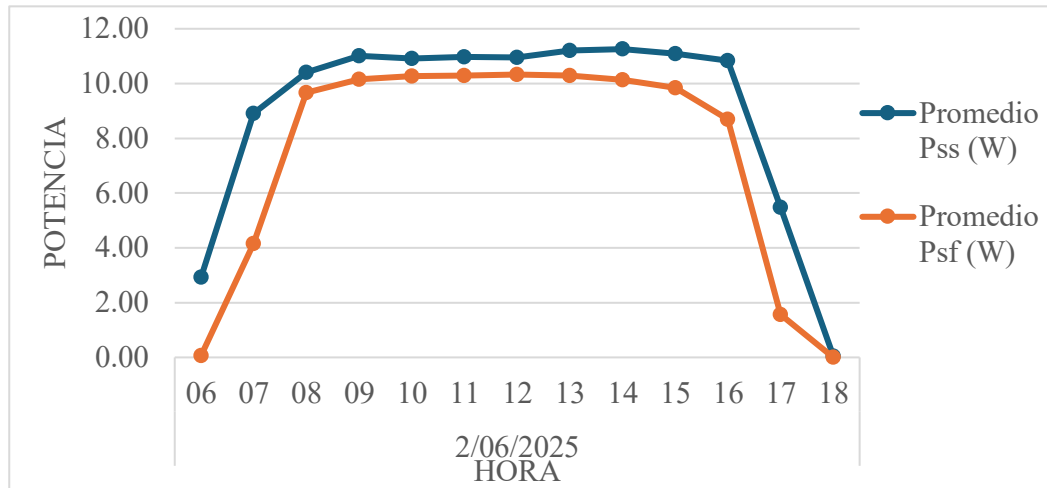
El valor más alto del promedio diario de potencia eléctrica calculada a partir de los valores obtenidos de voltaje y corriente de ambos paneles se registró el 2 de junio del 2025.

El aumento en la potencia generada se atribuye a la radiación diaria de (5.62 Kw-h/m²/día), a la HSP que corresponde en unos 5.62 y a condiciones climáticas donde el cielo se mantuvo mayormente despejado, en el cual la temperatura máxima alcanzó los 28.07 °C y la mínima fue de 16.56 °C, este día tiene la mayor temperatura mínima respecto al demás día de prueba, notamos que la HSP se prolongó por más tiempo brindándonos mayor cantidad de

producción de voltaje y corriente en consecuencia valores altos de eficiencia energética de los sistemas Pss y Psf.

Figura 39

Grafica de la potencia por hora del día con mayor producción energética



Nota: Fuente Elaboración Propia

3.5.8. Margen de Error del Panel Fotovoltaico con Seguidor Solar (Pss).

El margen de error indica la incertidumbre en los resultados de los valores medidos y muestra cuánto pueden diferir los resultados de la muestra de la población total.

Para poder realizar los cálculos del margen de error por cada día de prueba ejecutado se utilizó la siguiente variante de la formula donde debemos conocer la desviación estándar.

▪ Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_1 - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = desviación estandar muestral

n = número de datos

x_1 = cada uno de los valores

$\bar{x}$ = media aritmetica de los datos

▪ Margen de error

$$ME = Z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

ME: Margen de error

Z: Valor crítico Z, según el nivel de confianza (por ejemplo, 1.96 para 95%)

σ : Desviación estándar (si es una media)

n: Tamaño de la muestra

Durante el periodo de los 25 días de medición, se realizó una gráfica de potencia por hora para el sistema Pss y se calculó su margen de error utilizando la variación estándar en hoja de cálculo de Excel.

Tabla 6

Potencia por hora y variación estándar de los 25 días medidos

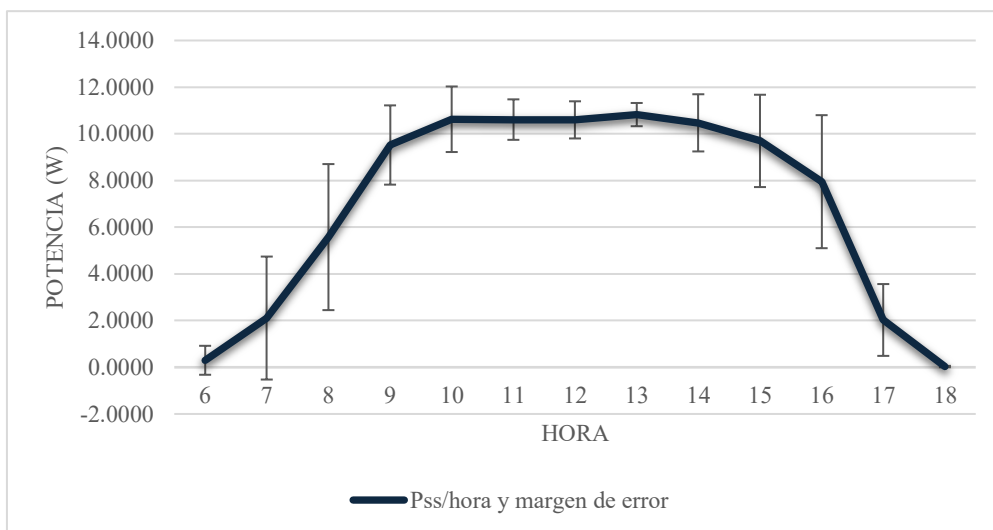
Hora	Potencia/hora	desv est $\pm$	desv est +	desv est -
6	0.2998	0.6204	0.9203	-0.3206
7	2.1088	2.6340	4.7428	-0.5252
8	5.5770	3.1283	8.7053	2.4487
9	9.5223	1.6978	11.2202	7.8245
10	10.6266	1.4042	12.0307	9.2224
11	10.6117	0.8673	11.4790	9.7443
12	10.5991	0.7955	11.3946	9.8036
13	10.8250	0.4975	11.3225	10.3276
14	10.4720	1.2250	11.6969	9.2470
15	9.6984	1.9774	11.6758	7.7211
16	7.9514	2.8494	10.8008	5.1020
17	2.0266	1.5386	3.5652	0.4880
18	0.0316	0.0289	0.0605	0.0028

Nota: Elaboración Propia

La grafica 40, muestra una mayor dispersión de datos a las 8 y 16 horas, lo que demuestra que en esas horas durante el periodo de pruebas se tuvo una gran variación de datos, dando una incertidumbre más alta de ± 3.128 , mientras que la menor variación se tuvo a las 13 horas.

Figura 40

Potencia por hora y margen de error del periodo de prueba de los 25 días del Pss



Nota: elaboración propia

3.5.9. Margen de Error del Panel Solar Fotovoltaico Fijo (Psf).

El margen de error para el panel Psf se realizó con el fin de entender la dispersión de los datos por cada hora durante el periodo de prueba. El análisis de datos se realizó en una hoja de cálculo de Excel donde muestra los siguientes valores.

Tabla 7

Potencia por hora y margen de error del periodo de prueba de los 25 días del Psf

Hora	Potencia/h	desv est	desv est +	desv est -
6	0.0053	0.0057	0.0109	-0.0004
7	0.5091	1.0922	1.6014	-0.5831
8	3.2194	2.8100	6.0294	0.4094
9	7.6410	2.0630	9.7040	5.5780
10	9.4582	1.6444	11.1026	7.8138
11	9.8263	0.9695	10.7958	8.8567
12	10.0761	0.8899	10.9660	9.1862
13	10.0398	0.5472	10.5871	9.4926
14	9.4033	1.3239	10.7273	8.0794
15	8.1881	2.1866	10.3747	6.0015

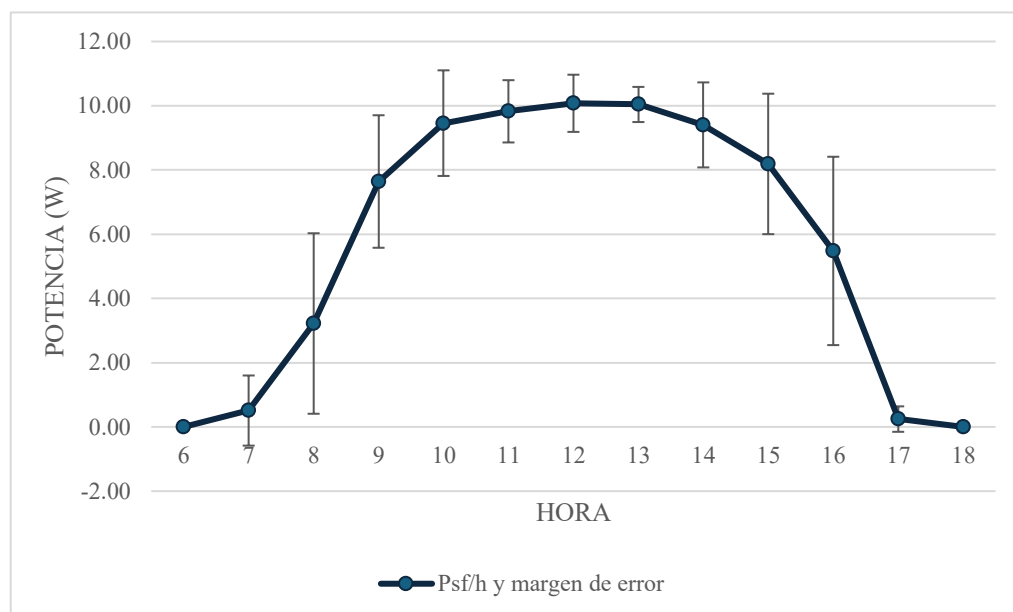
16	5.4795	2.9327	8.4122	2.5468
17	0.2433	0.3961	0.6394	-0.1528
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Nota: Fuente Elaboración Propia

A continuación, se muestra una gráfica con un histograma con punto máximo a las 12 del mediodía y con caída de potencia a las 17 horas, esto se debe a que este sistema fotovoltaico es fijo lo que refleja que a inicio y fin del día logra captar poca radiación solar.

Figura 41

Potencia por hora y variación estándar de los 25 días medidos



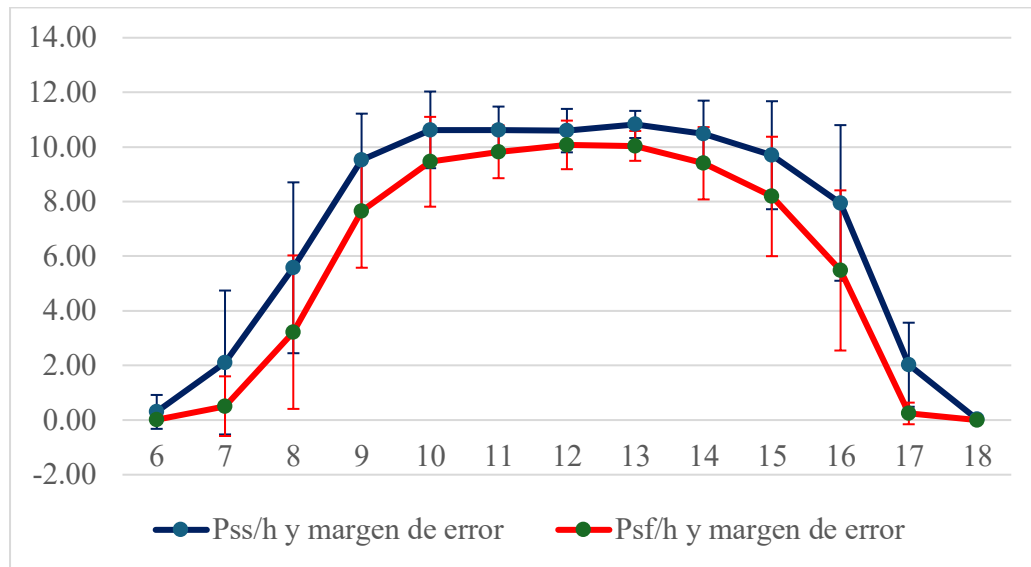
Nota: elaboración propia

3.5.10. Relación de Margen de Error de los Paneles Pss y Psf

Esta grafica muestra dos histogramas de potencia por cada hora de los 25 días de toma de datos, donde la línea azul se refiere al sistema Pss y la línea roja al sistema Psf.

Figura 42

Relación de potencia y margen de error de los sistemas Pss y Psf



Nota: Elaboración Propia

Los resultados confirman que el uso de un panel con seguimiento solar permite un incremento promedio de potencia del 21.74% respecto a un panel fijo. Esta ganancia energética puede traducirse en una mejora sustancial del rendimiento global de una planta fotovoltaica, justificando la inversión adicional en sistemas de seguimiento.

Además, los resultados corroboran que, en un entorno como el de Jaén (Cajamarca, Perú), caracterizado por buena irradiación solar, la implementación de sistemas con seguimiento solar puede mejorar significativamente la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos, justificado tanto técnica como económicamente cuando se busca maximizar la producción eléctrica en espacios limitados.

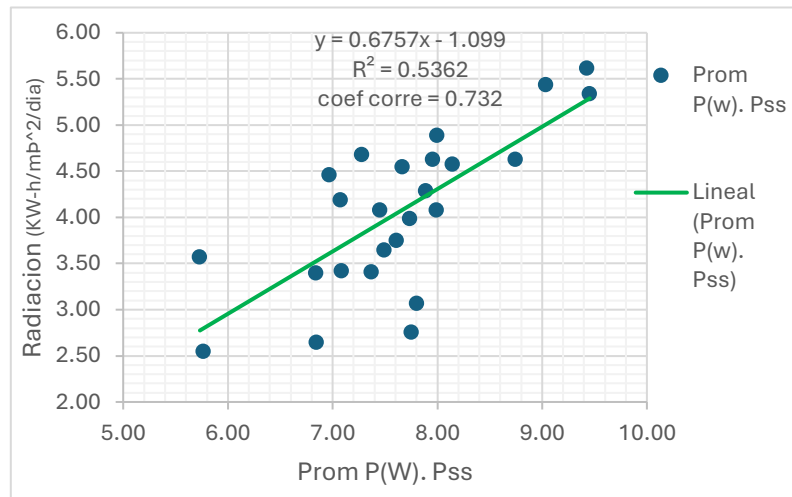
IV. DISCUSIÓN

Los hallazgos obtenidos a través de esta investigación evidencian de manera contundente la significativa superioridad del panel fotovoltaico que cuenta con un sistema de seguimiento solar en comparación con aquel que se mantiene en una posición fija, en términos de eficiencia energética. A lo largo del tiempo de análisis, que abarcó un total de 25 días, se notó una elevación promedio de la potencia generada que osciló entre un 19.59% y un 25.67% a favor del panel instalado con un sistema de seguidor solar. Teniendo en cuenta que la energía eléctrica de cada sistema fotovoltaico es prácticamente directamente proporcional a la

radiación se realizó graficas de dispersión para ambos sistemas y se avaluó su coeficiente de correlación que oscila entre 0.732 y 0.741, indicando correlación positiva fuerte entre las dos variables analizadas en las gráficas de dispersión. Esto significa que cuando una variable aumenta, la otra también aumenta, y existe una asociación lineal significativa entre radiación y potencia eléctrica generada por los sistemas fotovoltaicos, ver figuras 47 y 48.

Figura 43

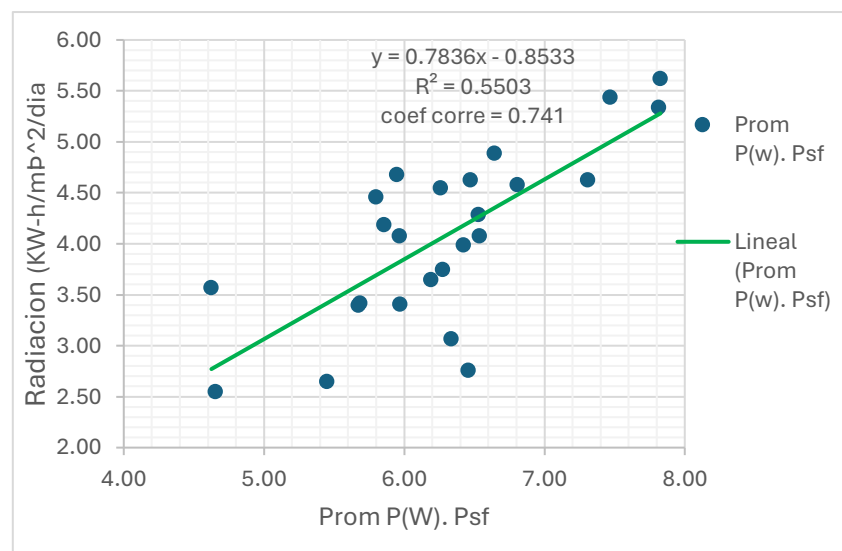
Grafica de dispersión de radiación y potencia de Pss



Nota: Elaboración Propia

Figura 44

Grafica de dispersión de radiación y potencia de Psf



Nota: Elaboración Propia

Este hallazgo es coherente con los estudios realizados por diversos investigadores en esta área.

El análisis de los resultados respecto al **objetivo específico 1**, evidencian que el comportamiento del recurso solar en Jaén está fuertemente condicionado por la variabilidad climática, lo que coincide con estudios que destacan la importancia de incorporar factores meteorológicos adicionales a la irradiancia directa en los análisis de rendimiento fotovoltaico (Ruiz & Valenzuela, 2022). En este caso, las variaciones de temperatura, nubosidad, precipitación y velocidad del viento incidieron en la producción energética, generando oscilaciones en la hora solar pico (HSP), que promedió 4.067 h/día. Este valor se encuentra dentro del rango esperado para regiones intertropicales, lo que refuerza su potencial para la implementación de proyectos solares (Guznan, et al., 2020; Tapia Del Pino, 2023).

La radiación promedio registrada revela una estabilidad relativa, aunque con descensos significativos en días de elevada nubosidad o precipitaciones. Sin embargo, la lluvia cumplió una doble función: redujo la radiación directa, pero favoreció el mantenimiento de los módulos al remover polvo y partículas, aspecto ya señalado por Vargas (2025) en contextos similares. En relación con la velocidad del viento, se observó un efecto positivo en el enfriamiento de las celdas, lo cual optimizó el rendimiento eléctrico, siempre que las velocidades no alcanzaran niveles extremos. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Bolaños y Gómez (2023), quienes enfatizan la necesidad de equilibrar el beneficio térmico frente al riesgo estructural.

La nubosidad, estimada entre 55% y 63% de cielo despejado, redujo la radiación directa, aunque permitió la captación de radiación difusa. Esta condición es clave en zonas tropicales, donde la intermitencia solar no impide, sino que modula la eficiencia de los sistemas (Chicaiza, 2024). Finalmente, la selección de paneles monocristalinos SY-30 OPALUX se sustentó en evidencias científicas y técnicas que confirman su mayor eficiencia respecto a los policristalinos (Zapana & Auccahuaque, 2021), además de la necesidad metodológica de usar paneles de un mismo lote de producción para asegurar la confiabilidad del estudio.

En conjunto, los hallazgos ratifican que la evaluación integral del recurso solar no puede limitarse al análisis de irradiancia, sino que debe contemplar las interacciones complejas de variables climáticas y la adecuada selección tecnológica, lo cual garantiza mayor precisión en la estimación de la eficiencia energética.

Respecto a los resultados del **objetivo específico 2**, se evidencia un avance significativo en el diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos con soporte fijo y con seguidor solar, integrando tanto componentes mecánicos como electrónicos. El uso de software CAD (SolidWorks) permitió un modelado preciso de las estructuras, lo que coincide con lo señalado por López (2022), quienes destacan que la simulación en CAD optimiza la etapa de prototipado y reduce costos en proyectos de ingeniería. Asimismo, el diseño electrónico mediante KiCAD y Fritzing facilitó la visualización de conexiones y el montaje de prototipos virtuales, fortaleciendo la validez de los resultados obtenidos (Barzola, 2020).

La obtención de materiales tales como las tarjetas ESP32 y los sensores INA219 facilitó la implementación de un sistema de monitoreo sólido, en conformidad con las directrices propuestas para sistemas de energía distribuida inteligente (Kolandasamy y Sivalingam , 2024). La incorporación de PCBs impresas aseguró mayor estabilidad y confiabilidad frente a condiciones ambientales adversas, aspecto también subrayado por Bashir et al. (2020) en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos autónomos.

En el ámbito de programación, la implementación del algoritmo SPA demostró precisión en el cálculo de la posición solar, mejorando el desempeño del sistema seguidor, en línea con lo planteado por Chuco (2024) sobre la eficiencia de librerías especializadas en energía solar. Finalmente, el uso de plataformas como ThingSpeak para almacenamiento y visualización de datos garantizó un monitoreo en tiempo real, consolidando integración del sistema en un entorno de Internet de las Cosas (IoT), tendencia cada vez más relevante en proyectos de energías renovables (Flores y Cossio, 2021)

Los resultados obtenidos en el diseño de las estructuras de soporte y los circuitos electrónicos evidencian la importancia de la integración entre herramientas de ingeniería asistida por computadora y sistemas de automatización aplicados a energías renovables. En primer lugar, el uso de SolidWorks permitió una modelación precisa de las estructuras de soporte, asegurando la compatibilidad dimensional con los paneles fotovoltaicos y considerando condiciones ambientales de exposición, aunque sin un análisis estructural detallado de cargas y esfuerzos. Este aspecto se alinea con lo planteado por Castellanos, et al. (2023), quienes destacan que la simulación CAD constituye un punto de partida esencial para garantizar la viabilidad de prototipos en sistemas solares. Asimismo, el diseño diferenciado de estructuras fijas y con seguidor solar abre la posibilidad de comparar su rendimiento bajo

condiciones reales, coincidiendo con lo expuesto por Shahabaddin y Firoozabadi (2023), quienes resaltan la eficacia de los seguidores solares en maximizar la captación de radiación.

En cuanto al diseño de los circuitos electrónicos, el empleo de KiCAD y Fritzing permitió visualizar, probar y validar la conectividad de componentes antes de su implementación física, reduciendo errores en la fase experimental. El uso del módulo MAX485 para la comunicación a distancia y la inclusión de sensores INA219 para la medición de voltaje y corriente constituyen elementos claves para garantizar un sistema robusto y confiable, tal como subrayan Demir, B.E. (2023) en su investigación sobre monitoreo inteligente de sistemas fotovoltaicos. Del mismo modo, la incorporación de placas ESP32 como núcleo de control favoreció la gestión integral de datos y la automatización, aspecto que concuerda con lo señalado por Aznar (2021), quienes destacan el papel de los microcontroladores en el desarrollo de proyectos de energías renovables de bajo costo.

La impresión de los circuitos en PCB y su encapsulado con silicona fortalecen la durabilidad y estabilidad del sistema, respondiendo a la necesidad de adaptarse a entornos de intemperie. Este proceso aporta ventajas frente al uso de protoboards, optimizando la seguridad en las conexiones y reduciendo interferencias, en línea con lo discutido por Armas y Cotrado, (2023), quienes enfatizan que la miniaturización y robustez de los PCB son determinantes en proyectos aplicados en campo. La implementación final de los circuitos con componentes como drivers DRV8825, motores NEMA 17 y sensores LDR muestra una articulación coherente entre hardware y software, orientada a la eficiencia en el movimiento del seguidor solar.

Finalmente, la integración del algoritmo SPA en el entorno Arduino IDE permitió un control dinámico y preciso de la posición solar, lo cual asegura la adecuada orientación del sistema a lo largo del día. La gestión de datos mediante ThingSpeak y el respaldo en memoria SD no solo garantizan la trazabilidad de la información, sino también su disponibilidad para análisis posteriores, fortaleciendo el enfoque experimental del estudio. De este modo, el trabajo presentado refleja una propuesta tecnológica completa que combina diseño mecánico, electrónico y digital, en concordancia con las tendencias recientes en innovación para sistemas fotovoltaicos inteligentes (Inca et al., 2023).

Con respecto a los resultados del **objetivo específico 3**, la fabricación de sistemas fotovoltaicos, tanto en su configuración estática como en la modalidad de seguimiento solar, constituye un progreso notable en la implementación de tecnologías dirigidas a la optimización de la captación de radiación solar. El uso de materiales reciclados y de segunda mano,

adaptados a los requerimientos del diseño en SolidWorks, evidencia un enfoque sostenible y económico, alineado con la tendencia actual hacia la economía circular en proyectos de ingeniería (Shahabaddin y Firoozabadi, 2023). La implementación de chumaceras y ejes de soporte garantiza la estabilidad estructural, aspecto fundamental para el funcionamiento confiable del sistema en condiciones ambientales variables (Vargas, 2025).

En cuanto al mecanismo de acimut y elevación, la integración de motores paso a paso Nema 17, acoplados a poleas y tornillos trapezoidales, refleja un diseño funcional de bajo costo con componentes reutilizados, lo cual coincide con propuestas recientes de sistemas solares de pequeña escala que priorizan la accesibilidad tecnológica (Isaac, 2024). La elección de un sistema dual (horizontal y vertical) permite ampliar el rango de captación energética, corroborando estudios que señalan incrementos de hasta 30% en eficiencia cuando se utilizan seguidores solares frente a sistemas fijos (Krishna, et al., 2024).

Respecto a la estructura fija, la inclinación adoptada de 15° responde tanto a las recomendaciones normativas como a criterios técnicos locales, asegurando una mayor captación anual en zonas de baja latitud. Esto se encuentra en concordancia con investigaciones que destacan la importancia de ajustar la inclinación según la ubicación geográfica para maximizar la eficiencia (Castillo, 2021). Asimismo, la orientación hacia el norte verdadero en el hemisferio sur confirma la correcta aplicación de estándares internacionales de instalación (Rizal, et al., 2023).

Finalmente, la ubicación estratégica de los sistemas en la azotea del campus, libre de sombras y con coordenadas precisas, así como la validación de trayectorias solares mediante plataformas digitales como *Sun Earth Tools*, reflejan la integración de recursos tecnológicos en el proceso experimental. Estos aspectos fortalecen la confiabilidad de los resultados y contribuyen a la aplicabilidad de los sistemas fotovoltaicos en entornos académicos y rurales, donde la investigación busca un impacto social y energético sostenible (Cabezas, et.al, 2018).

Respecto a los resultados del **objetivo específico 4**, obtenidos en las pruebas de campo evidencian que la implementación de un sistema fotovoltaico con seguidor solar (Pss) ofrece una ventaja significativa frente a los sistemas fijos (Psf), alcanzando un incremento promedio de potencia del 21.74%. Esta diferencia, consistente a lo largo de los 25 días de evaluación, refleja la capacidad del seguidor solar de optimizar la orientación del panel, maximizando la captación tanto de radiación directa como difusa, lo que coincide con estudios recientes que destacan la eficiencia de estas tecnologías en climas de alta irradiación (Cabezas, et al. 2018).

El comportamiento diario de la generación confirma que el Pss no solo produce mayores picos de potencia, sino que también mantiene valores sostenidos durante más horas del día, lo que se traduce en una mejor cobertura de la demanda energética.

La relación entre temperatura ambiente y eficiencia energética muestra cómo las condiciones climáticas influyen en el desempeño de las celdas. Se comprobó que, a temperaturas superiores a 25 °C, la eficiencia disminuye ligeramente, en línea con lo descrito por Okonkwo et al. (2025). quienes señalan que el aumento térmico genera pérdidas de voltaje y, por ende, una reducción de potencia. Sin embargo, en el contexto de Jaén, donde las temperaturas se ubican en rangos moderados durante el periodo de medición, el efecto térmico no anuló la ventaja del seguidor solar. Del mismo modo, los análisis de irradiancia obtenidos de la plataforma NASA POWER confirmaron niveles altos de radiación ($\approx 6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$), similares a los reportados en otras regiones tropicales (Shahabaddin y Firoozabadi 2023), lo que sustenta el potencial de la zona para el desarrollo de proyectos solares.

Otro aspecto relevante fue la influencia de las condiciones atmosféricas variables. En días nublados o con lluvias parciales, el Pss demostró una mayor capacidad de captación energética frente al sistema fijo, lo que generó diferencias porcentuales superiores al 24%. Este resultado respalda la hipótesis de que los seguidores solares aprovechan mejor la radiación difusa, tal como lo explica Castillo (2021), al mantener el panel perpendicular al sol incluso en escenarios de baja radiación. En contraste, en días despejados con elevada irradiancia, la diferencia porcentual fue menor, aunque los valores absolutos de generación fueron los más altos del periodo, lo que refuerza la importancia de analizar conjuntamente irradiancia y eficiencia de conversión.

Asimismo, el análisis del comportamiento horario reflejó un patrón diurno típico con un ascenso progresivo de potencia en la mañana, un máximo en horas centrales y un descenso vespertino. En algunos días se evidenció un “doble pico”, asociado a nubosidad transitoria y lluvias, lo que concuerda con reportes de Krishna et.al. (2024), quienes encontraron que la intermitencia de la radiación afecta de manera diferenciada a los sistemas solares según su capacidad de seguimiento. Los datos de margen de error en ambos sistemas también muestran que, aunque existe variabilidad en horas específicas (8:00 y 16:00), la tendencia general se mantiene, consolidando la confiabilidad de los resultados.

En suma, los hallazgos confirman que la implementación de un seguidor solar en Jaén permite incrementar de manera sustancial la eficiencia energética en comparación con un

sistema fijo, lo cual representa un beneficio técnico y económico. Este resultado se alinea con la tendencia global de maximizar la productividad energética en espacios reducidos mediante tecnologías de seguimiento (Cabezas, et al. 2018; Okonkwo et al. 2025). Así, se ratifica que, en contextos de elevada radiación solar, como el observado en la ceja de selva amazónica peruana (zona de Jaén), los sistemas con seguimiento constituyen una alternativa estratégica para mejorar la sostenibilidad y rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como objetivo general comparar la eficiencia energética de un panel fotovoltaico fijo con uno de seguimiento solar en Jaén, en 2025. Los resultados permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

El análisis del recurso solar en Jaén confirma que la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos depende no solo de la irradiancia, sino también de la interacción con variables climáticas como nubosidad, precipitación, temperatura y viento. Los resultados obtenidos, con una HSP promedio de 4.067 h/día, reafirman el potencial de la región para proyectos solares, siempre que se considere la influencia de factores meteorológicos. Asimismo, la selección de paneles monocristalinos asegura mayor confiabilidad en la estimación del rendimiento, fortaleciendo la validez metodológica del estudio.

El diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos con soporte fijo y seguidor solar han demostrado la eficacia de la integración entre herramientas CAD, plataformas de simulación electrónica y entornos de programación especializados. Esta articulación permitió optimizar tanto la fase de prototipado como la confiabilidad de los componentes, garantizando un desempeño adecuado frente a las exigencias del entorno real. Asimismo, la incorporación de monitoreo IoT y algoritmos de cálculo solar posiciona al sistema como una propuesta innovadora, alineada con las tendencias actuales en energías renovables. En conjunto, el estudio aporta bases sólidas para el desarrollo de soluciones sostenibles y escalables en el ámbito de la generación fotovoltaica.

La fabricación de sistemas fotovoltaicos con soporte fijo y seguidor solar evidencian un avance técnico y sostenible, al incorporar materiales reciclados y componentes accesibles

que optimizan la captación de energía. El diseño dual y la inclinación de 15° responden a criterios técnicos y normativos que garantizan eficiencia y confiabilidad. Asimismo, la correcta orientación e instalación en la azotea de la UNJ, junto con el uso de herramientas digitales, refuerzan la validez experimental y su aplicabilidad en contextos académicos y rurales con enfoque social y energético sostenible.

La implementación de sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar constituye una alternativa altamente eficiente frente a los sistemas fijos, al incrementar la generación promedio de energía en más del 21%. Esta ventaja se mantuvo de forma consistente bajo diversas condiciones atmosféricas, lo que evidencia su capacidad de aprovechar tanto la radiación directa como la difusa. Además, el análisis térmico y de irradiancia confirma que, en contextos de elevada radiación y temperaturas moderadas como Jaén, el efecto de las pérdidas por temperatura no anula los beneficios del seguidor solar. En consecuencia, se ratifica su pertinencia como estrategia técnica y económica para impulsar proyectos de energía renovable en regiones tropicales.

5.2. RECOMENDACIONES

Los futuros proyectos fotovoltaicos en Jaén deben incorporar modelos de predicción climática y sistemas de monitoreo en tiempo real, a fin de anticipar el impacto de la variabilidad meteorológica sobre el rendimiento de los sistemas. Esto permitirá optimizar la planificación energética y mejorar la confiabilidad de las estimaciones de generación. Asimismo, resulta pertinente priorizar el uso de paneles monocristalinos en las evaluaciones técnicas, dado su desempeño más consistente frente a fluctuaciones ambientales, lo cual contribuirá a consolidar la fiabilidad de los resultados y favorecer la sostenibilidad de las inversiones en energía solar.

Se debe fortalecer la integración de tecnologías digitales como CAD, simulación electrónica e IoT en futuros proyectos, promoviendo la optimización del diseño y la eficiencia operativa. Además, se debe promover la investigación en algoritmos de cálculo solar para fortalecer la innovación en energías renovables. Finalmente, se sugiere potenciar la escalabilidad de estas soluciones como aporte al desarrollo sostenible.

Es pertinente impulsar iniciativas que promuevan la reutilización de materiales reciclados en la manufactura de estructuras fotovoltaicas, integrando criterios de sostenibilidad ambiental en su desarrollo. Además, se sugiere ampliar la implementación de prototipos en entornos rurales y educativos, para potenciar su impacto social y energético.

Se debe promover la adopción de sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar en regiones tropicales, dada su comprobada superioridad técnica y económica frente a los sistemas fijos. Su capacidad de optimizar la captación de radiación en diversas condiciones climáticas refuerza su viabilidad. Asimismo, resulta pertinente considerarlos como alternativa prioritaria en proyectos de energía renovable sostenible. Además, fortalecer la investigación mediante la ampliación de pruebas en diversos entornos geográficos y climáticos, a fin de validar la adaptabilidad del diseño propuesto.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armas, A. y Cotrado, A. J. (2023). Diseño e implementación de un sistema seguidor solar para la optimización de la carga en un acumulador de energía, usando paneles solares. [Tesis para titulación de Ingeniero Electrónico, Universidad Privada de Tacna]. <https://repositorio.upt.edu.pe>
- Aznar, E.F. (2021). Estudio y diseño de una instalación fotovoltaica sobre cubierta. [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://oa.upm.es/88927/3/TFG_EDU_ARDO_AZNAR.pdf
- Bashir, A.A., Dweri, M.A , Ghandoor, A.A , Hammad, B. , Kouz, W.A . (2020). Análisis de los efectos de la irradiancia solar, la temperatura de las celdas y la velocidad del viento en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos . *Int J Energy Econ Policy* ; **10** (1). 353-359 . <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/8591>
- Barzola, H. (2020). Optimización del diseño de paneles solares fotovoltaicos aplicando grafeno.[Tesis de bachillerato, Universidad Continental, Huancayo]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10387/1/IV_FIN_1
- Bautista, A. R., Espinoza, C. F., Barrena, G. M., & Gosgot, A. W. (2022). Rendimiento de sistema fotovoltaico autónomo de 500 Wp bajo las condiciones climáticas de Chachapoyas, Amazonas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 57. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.855>
- Biedma, C. (2022). Caso de estudio comparativo sobre rendimientos energéticos entre un panel solar fijo y un panel que sigue la trayectoria solar, instalados en una vivienda urbana del departamento de Mendoza, en las estaciones de invierno del 2020 y verano 2020-2021. Universidad Nacional de Cuyo.
- Bolaños, C.A. y Gómez, G. (2023). Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias. *Tecnología en Marcha*. 36, (1). 18-32. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5843>

- Cabezas, M. D., Franco, J. I., & Fasoli, H. J. (2018). Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19(2), 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19.2.013>
- Castellanos, T.V., Mantilla, N.A., Rey, J.M. Bautista, M. (2023). Diseño de un simulador de sistemas fotovoltaicos con conexión a la red usando la técnica de hardware-in-the-loop, *EIEI ACOFI*, sep. 2023. <https://doi.org/10.26507/paper.3153>
- Castillo, A. K. (2021). Estudio sobre los sistemas de producción de energía eléctrica utilizados en nuestro país, así como la forma de distribución. Producción de energía eléctrica utilizando paneles solares. [Tesis de grado Bachiller, Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/20153>
- Castro, M. J. J., Gómez, M. L. K., & Camargo, C. E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140–174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Chero, N. J., & Tesén, S. A. (2021). Implementación de un servomecanismo de posición a un panel solar utilizando lógica difusa para aumentar la eficiencia en la captación de energía solar. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Chicaiza, A.N. (2024). Estudio del comportamiento de paneles fotovoltaicos bajo diversas condiciones climatológicas mediante herramientas de programación. [Tesis de titulación de Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec> › UPS-GT004956
- Chuco, S. D. (2024). Evaluación del desempeño de los seguidores solares para optimizar la producción de energía fotovoltaica en la Universidad Nacional del Centro del Perú. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_9a63f7f9d79ea7527a1117ffbd42f62c/Details
- Demir, B.E. (2023). Diseño de un nuevo sistema de monitorización de bajo coste basado en el Internet de las Cosas para plantas solares fotovoltaicas autónomas y estimación de potencia. *Applied Sciences* , 13 (24), 13072. <https://doi.org/10.3390/app132413072> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Politécnico Estatal de Banjarmasin, Indonesia doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.021. *Energía Procedia* 32 (2013) 160 – 165

- Espinoza, C. (2014). Metodología de investigación tecnológica Pensando en sistemas. 1–206. 2da. Ed. ISBN: 978-612-00-1667-1. Impresiones Gráficas S.A.C. Huancayo, Perú.https://www.ispsn.org/sites/default/files/documentos-virtuais/pdf/metodologia_de_investigacion_tecnologica_-_ciro_-2da.pdf
Fondo Editorial de la UNAT. 1era. Edición.
- Flores, F. J., y Cossio, E. G. (2021). *Aplicaciones, Enfoques y Tendencias del Internet de las Cosas (IoT): Revisión Sistemática de la Literatura*. Artículos del Congreso Internacional de Investigación. Academia Journals Hidalgo 2021. Hidalgo, México.
- Guzmán, T; Obando-Ulloa, J; Álvarez de Eulate, X; Ilundain-López, R; Juan-Pérez, P; Castro-Badilla, G. (2020). Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte, Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 33-2. 37-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4191>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). Metodología de la Investigación (sexta edición). McGRAW-HILL /
- Inca, G. S., Cabrera, D. F., Villalta, D. F., Bautista, R. C., & Cabrera, H. D. (2023). Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: avances, desafíos y perspectivas. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(3), 9493–9509. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6835
- Isaac, I.A. (2024). Microrredes y transición energética Hacia los ecosistemas energéticos escalables. Bogotá D. C., Colombia. Chrome extension:
[//efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://investigacion.upb.edu.co/ws/portalfiles/portal/67444604/Microrredes](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://investigacion.upb.edu.co/ws/portalfiles/portal/67444604/Microrredes)
- Kolandasamy, S. y Sivalingam, T. (2024). Impacto de los materiales de los paneles en el rendimiento de las células solares. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1007528. <https://www.intechopen.com/chapters/1192372>
- Krishna, P.U., Parusharamulu, M.S., Simon, S.P., Vnkateswarlu Gundu, V.(2024). Sistemas de seguimiento solar: avances, desafíos y direcciones futuras: una revisión. *Informes de energía. Instituto Tecnológico Vellore – Chennai*.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.038>

- Laureano, O. C. B. (2023). Análisis comparativo de rendimientos entre un sistema fotovoltaico con seguidor solar de doble eje y un sistema fotovoltaico de montura fija. In Repositorio Institucional - UTP. Universidad Tecnológica del Perú.
<https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8368>
- López, M. (2022). Rendimiento de un sistema fotovoltaico autónomo de 275 wp con seguidor solar de bajo costo. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
<https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/2799?show=full>
- Mancilla, A. C. E., & Pardo. (2020). Diseño a Escala de Sistema Fotovoltaico con Seguidor Solar para Carga de Baterías de Dispositivos Portátiles en la UAP-Jaén. Alicia.Concytec, 1–96. <https://hdl.handle.net/UNJ/211>
- Moran (2022). Comparación entre paneles solares monocristalinos y policristalinos en zona costera de El Salvador. Universidad Don Bosco – El Salvador .
<https://rd.udb.edu.sv/server/api/core/bitstreams/febc6197-5a4a-44b8-b4d6-4a21c7f2d373/content>
- Okonkwo, P.C., et al. (2025). Sistemas solares fotovoltaicos bajo condiciones climáticas extremas: estudios de casos, clasificación, evaluación de vulnerabilidad y vías de adaptación. *Energy Reports*. (13)929-959 <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.067>
- Pazmiño, I., Moreira, A., Intriago, J. C., Ponce, M., & Moreano, M. (2024). Análisis Comparativo del Potencial Energético Extraíble entre Paneles Fotovoltaicos Fijo y con Sistema de Seguimiento de un Eje Instalados en la ULEAM. *Revista Técnica Energía*, 20(2), 98–107. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.599>
- Peña, M. D. W., & Acuña, G. R. (2022). Diseño de un Sistema Fotovoltaico para Suministrar Energía Eléctrica en el Caserío Juan Velasco Alvarado, Chirinos-Cajamarca, 2021. Universidad Nacional de Jaén. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/441>
- Rizal, Yusie & Wibowo, Sunu & Feriyadi,. (2023). Aplicación del algoritmo de posición solar para sistemas de seguimiento solar. *Energy Procedia*. 32. 160–165.
https://www.researchgate.net/publication/257712585_Application_of_Solar_Position_Algorithm_for_Sun-Tracking_System
- Rojas, F. E. (2020). Optimización del rendimiento de sistemas fotovoltaicos mediante la implementación de un prototipo de mecanismo seguidor con cuerdas para la orientación solar automática MSCOSA. Universidad del Norte.

- Ruiz, J., & Valenzuela, D. (2022). Innovaciones en sistemas fotovoltaicos inteligentes: integración de hardware y software. *Revista Iberoamericana de Energías Renovables*, 14(2), 77–93. <https://doi.org/10.4067/riER.2022.v14n2.077>
- Shahabaddin, S. y Firoozabadi, B. (2023). Comparación, evaluación y priorización de sistemas de seguimiento solar fotovoltaico utilizando métodos de toma de decisiones multicriterio. *Tecnologías y evaluaciones de energía sostenible* . 55. 102889. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102989>
- Tapia Del Pino, B. (2023). *Impacto de las condiciones climáticas en paneles fotovoltaicos con envejecimiento simulado*. [Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Ecuador].chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/19e19431-75fd-4b56-9fa3-c4164adba7bf/content
- Vargas, J. F. (2025). Análisis Comparativo de Generación Energía Fotovoltaica entre Paneles Solares Fijos Versus Paneles Automatizados . *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 9242-9257. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15602
- Vidal, J. (2022). Diseño de seguidor solar por medio de sensor de radiación para incrementar la producción de energía eléctrica en módulos fotovoltaicos. [Tesis de licenciatura. Universidad Nacional del Centro del Perú Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Huancayo, Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8545>
- Vilcanqui, A. J. A. (2020). Estudio para el desarrollo de un seguidor solar de dos ejes auto configurable para paneles fotovoltaicos. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Zapana, A. J., & Auccahuaque C. A. (2021). estudio comparativo del rendimiento de paneles fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos. [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte, Cajamarca Perú]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/29199/Tesis_Chris%20Auccahuaque_Alexander%20Zapana.pdf?sequence=1&isAllowed

AGRADECIMIENTOS

A Jesucristo nuestro Dios, porque siempre nos ha guiado por el camino de la bondad y la sabiduría; a nuestras familias por habernos brindado su apoyo incondicional para culminar nuestra carrera profesional.

Al Mg. Henry Oswaldo Pinedo Nava, nuestro asesor y amigo por su paciencia y valiosas recomendaciones a lo largo de este proceso. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A nuestros profesores, a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos, finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad Nacional de Jaén, la cual siempre abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

Joel y José Luís.

DEDICATORIAS

A mis queridos padres Jesús y Sabina, por ser ejemplo de esfuerzo, perseverancia y amor incondicional. Por brindarme siempre su apoyo, confianza y por enseñarme que los sueños se alcanzan con dedicación, trabajo constante y humildad. Este logro es tan mío como suyos.

A mis hermanos, por ser mi compañía en cada paso, por sus palabras de ánimo y por hacerme sentir que nunca estoy solo en el camino hacia la formación profesional.

Joel Carhuapoma Castillo

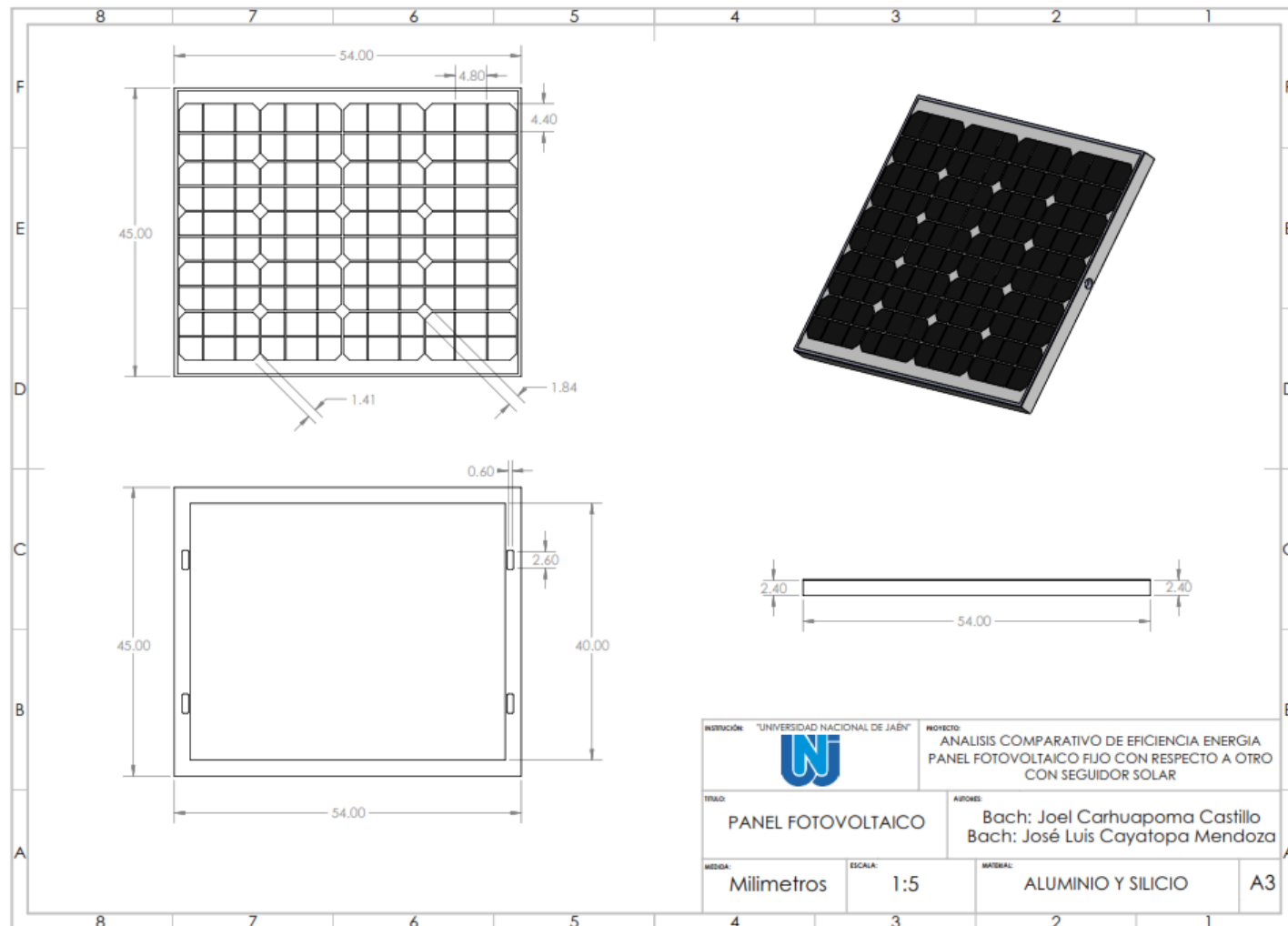
A mis padres Olmer y Juana, que siempre me dieron su incondicional apoyo durante mi formación profesional, por todo el sacrificio que demandó sostenerme emocional y económicamente todos estos años y por depositar su entera confianza en mis capacidades.

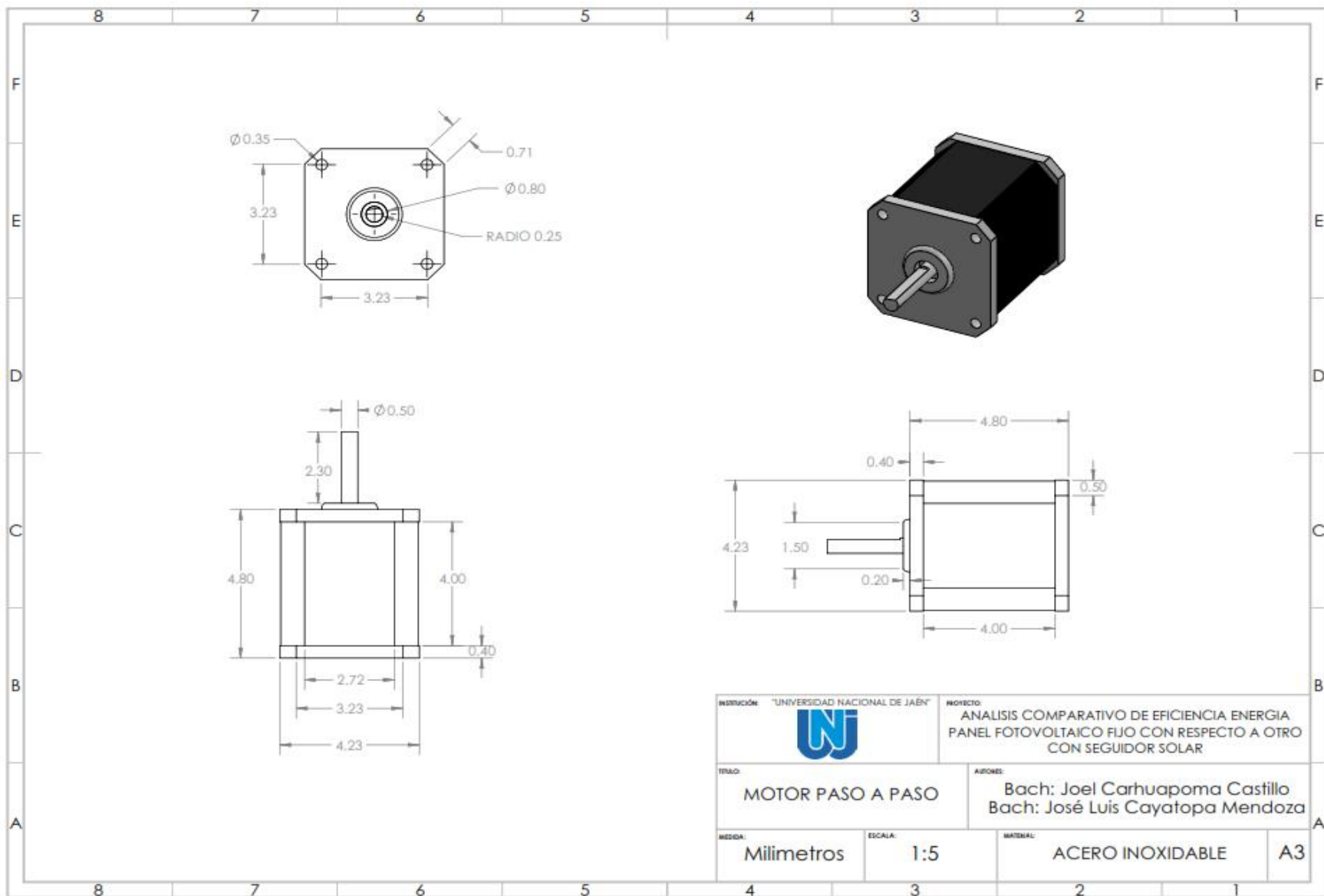
A mi hijo Luis André, con todo afecto, por su paciencia y comprensión durante estos años de tu niñez. Este éxito también te pertenece y afirmo con total convicción que he alcanzado el nivel profesional, y tú has constituido mi principal fuente de inspiración en este proceso de superación.

José Luis Cayatopa Mendoza

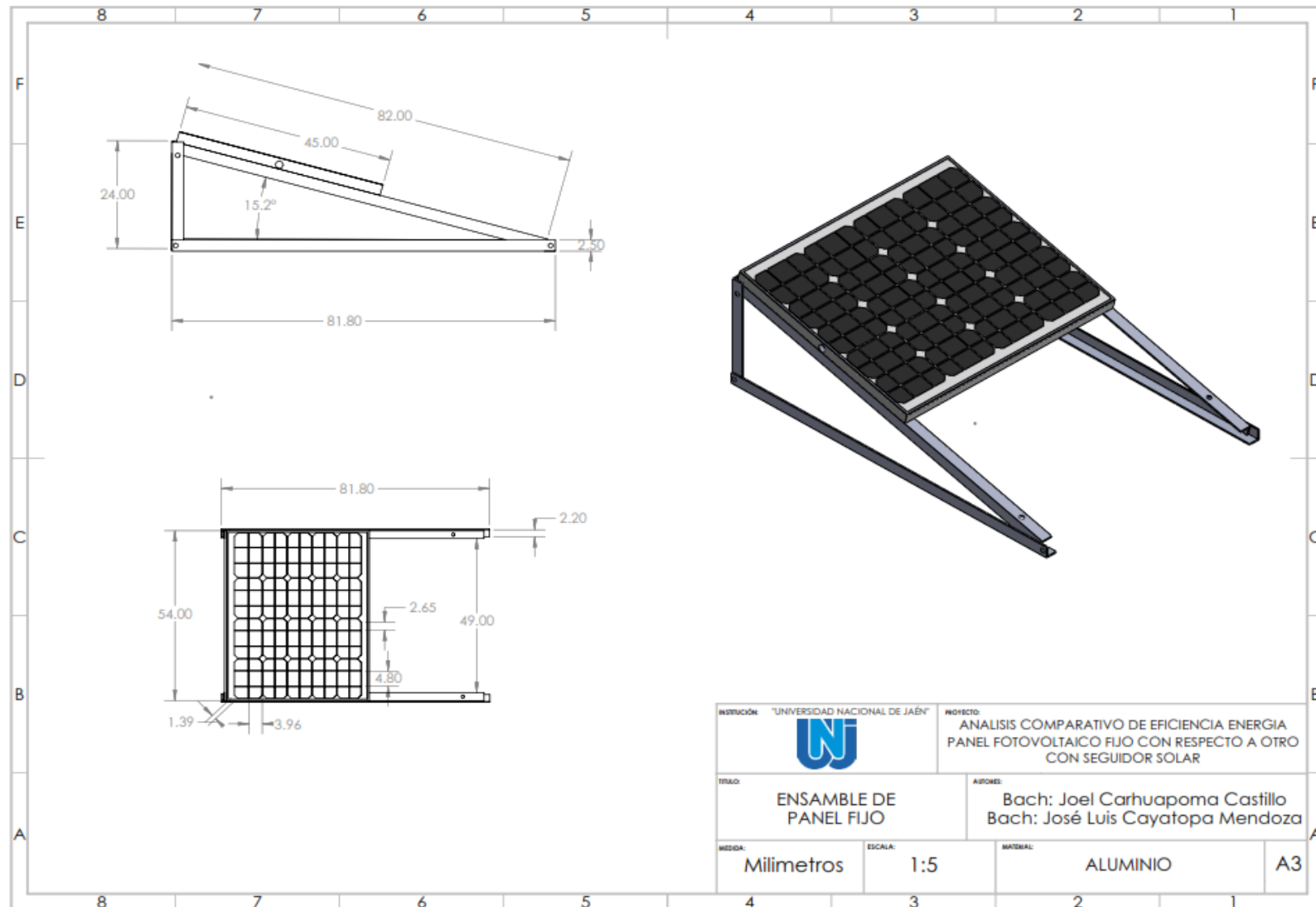
VII. ANEXOS

Anexo 1 Plano del el fotovoltaico SY-30M y motor nema 17

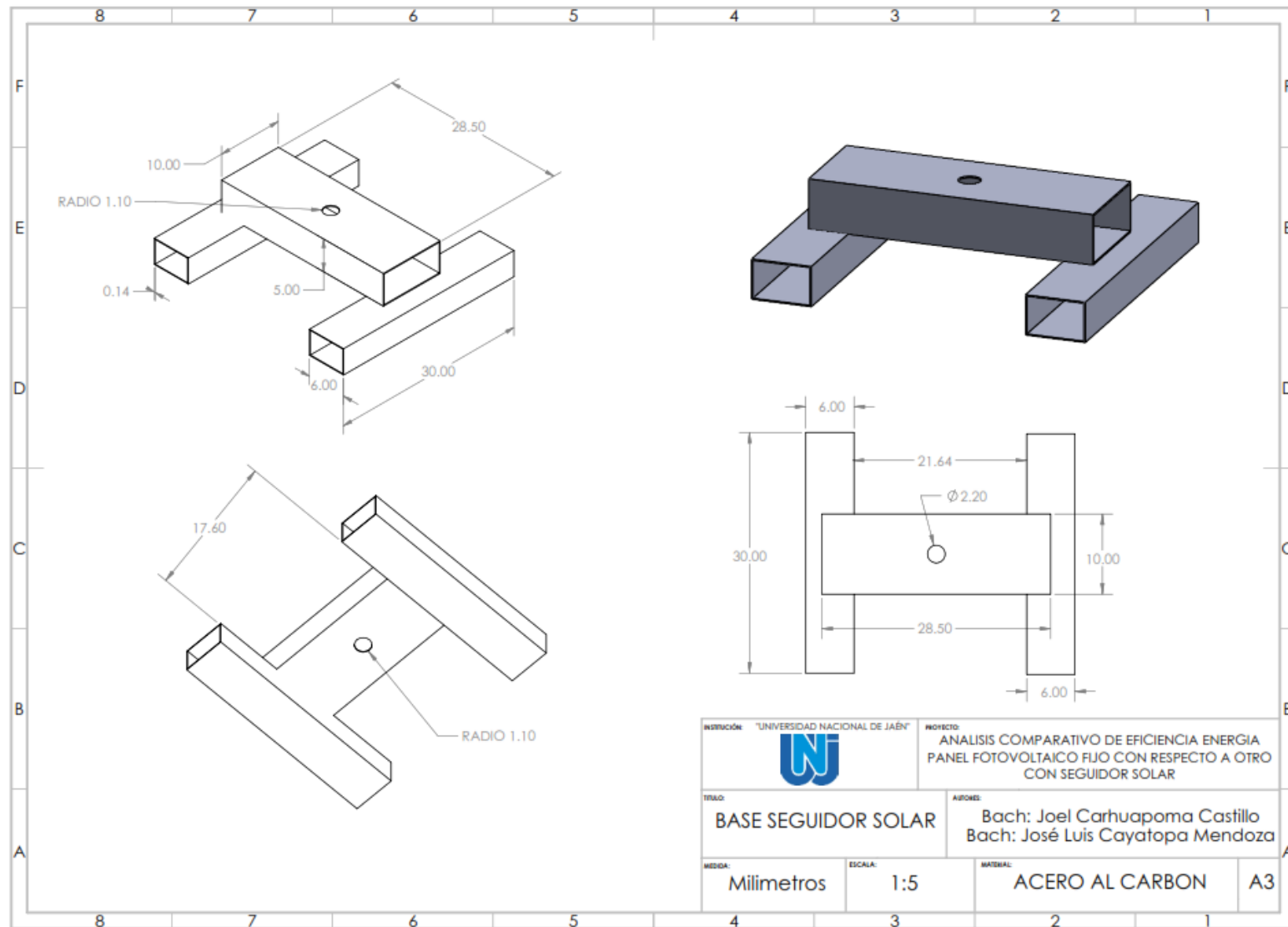


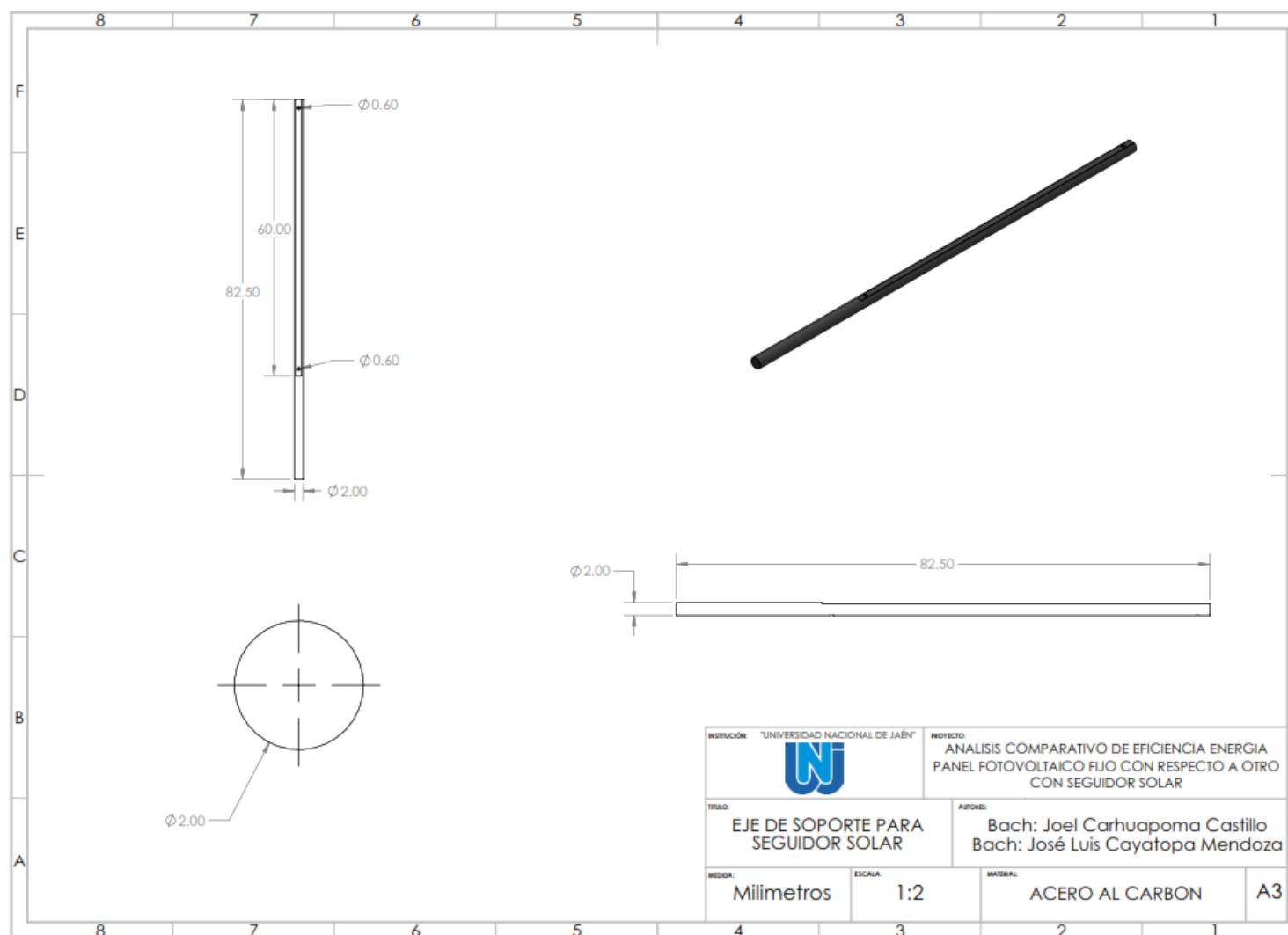


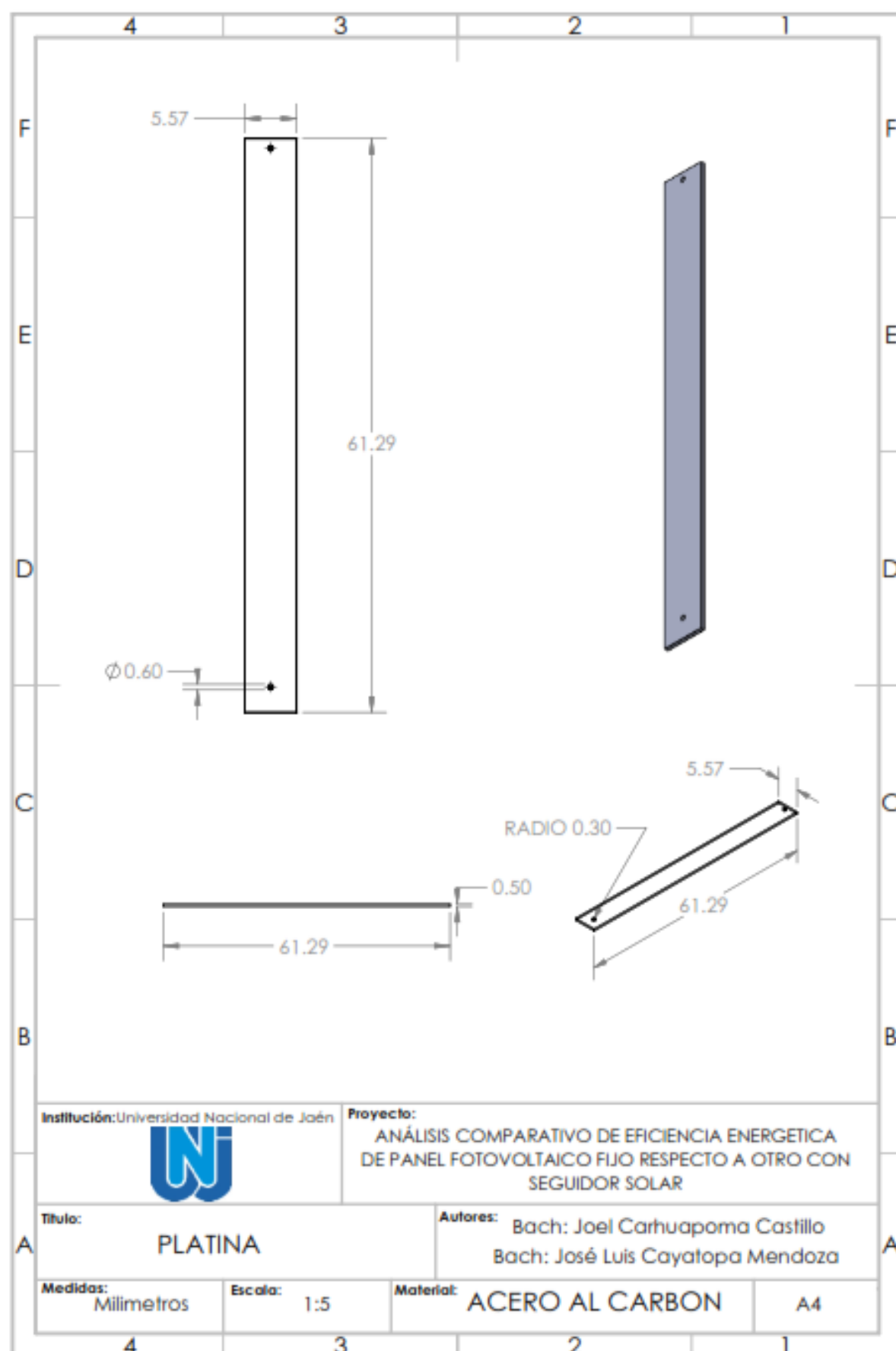
Anexo 2 Planos de estructura fija

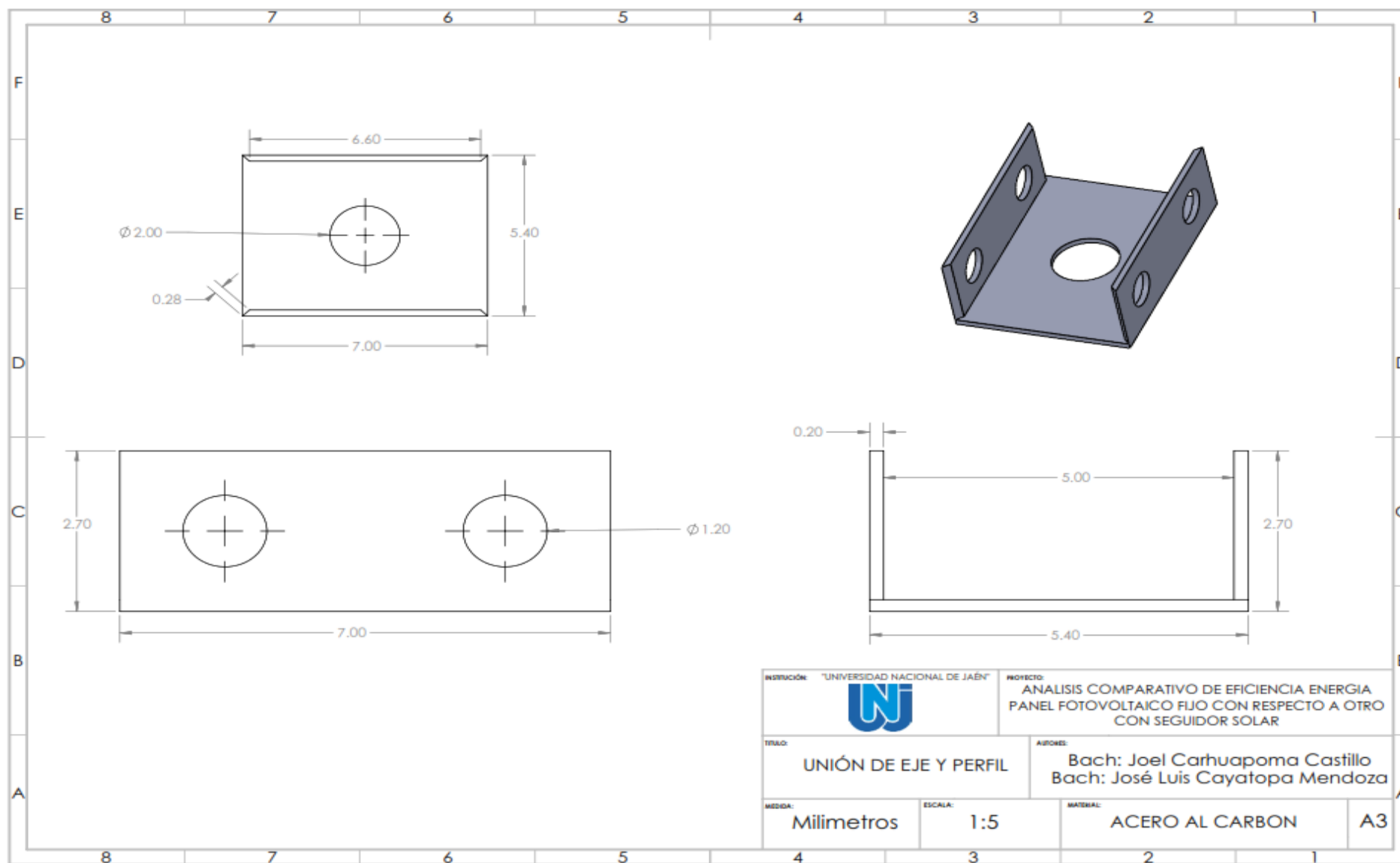


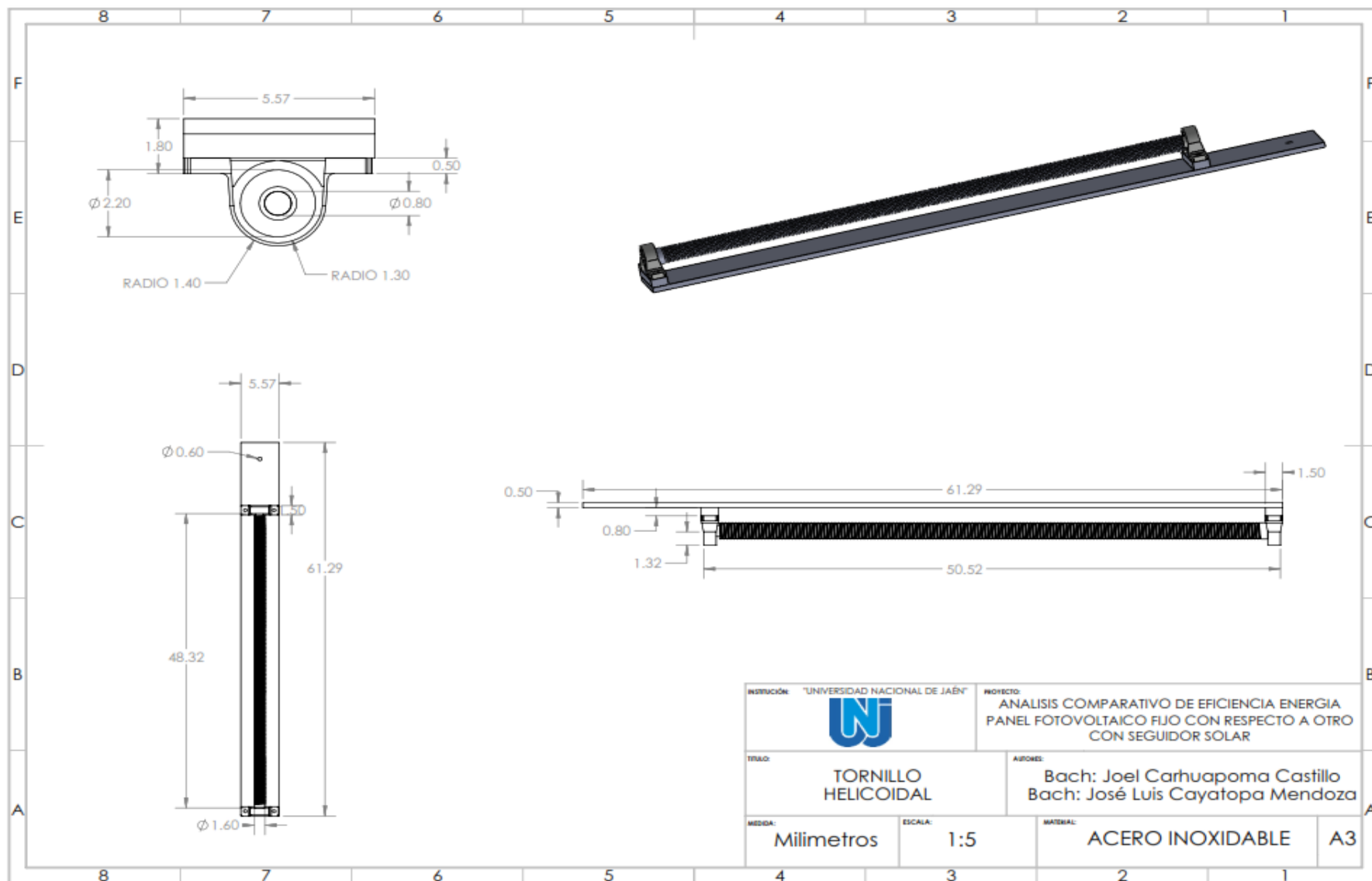
Anexo 3 Planos de la estructura con seguidor solar

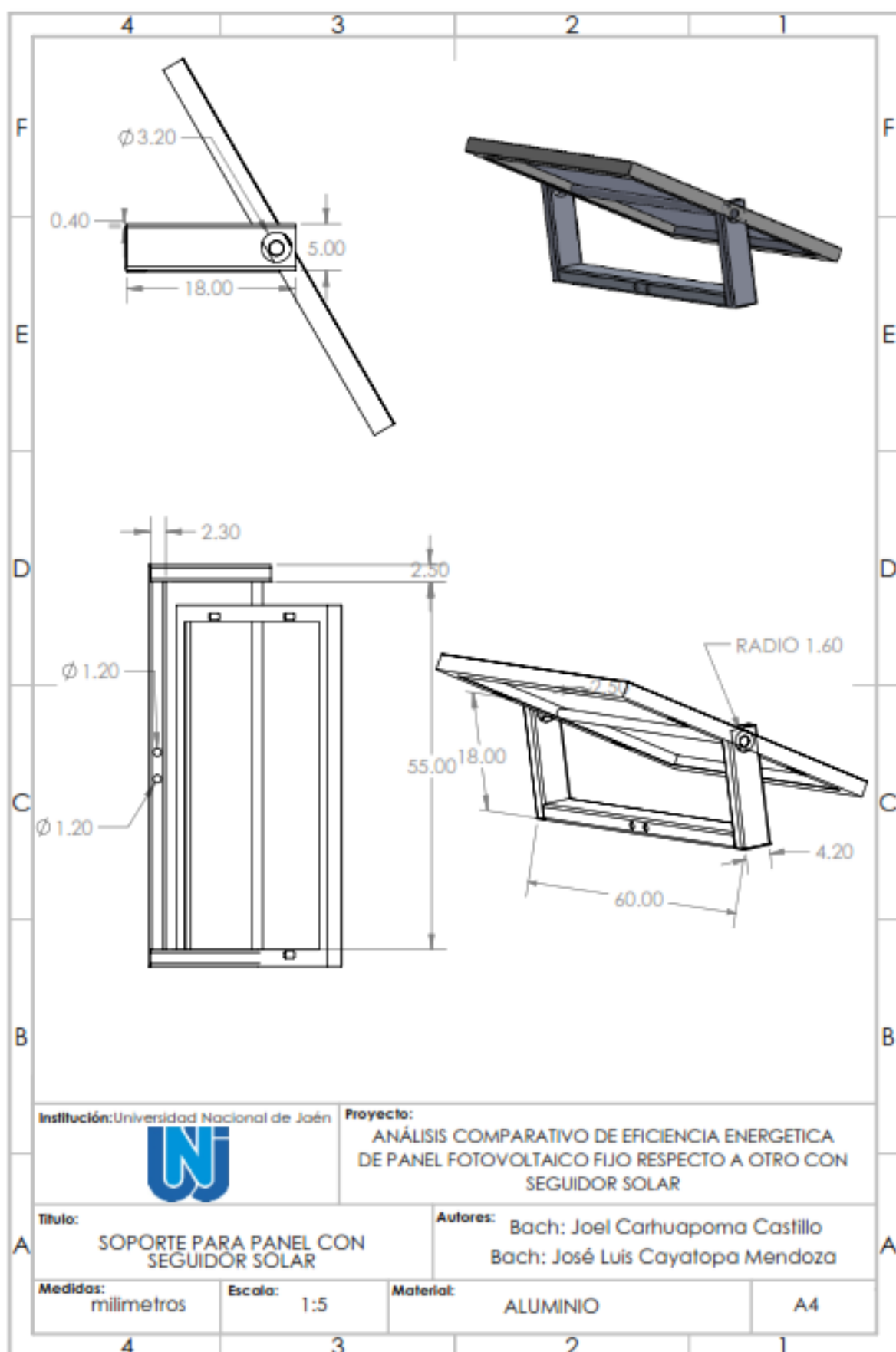


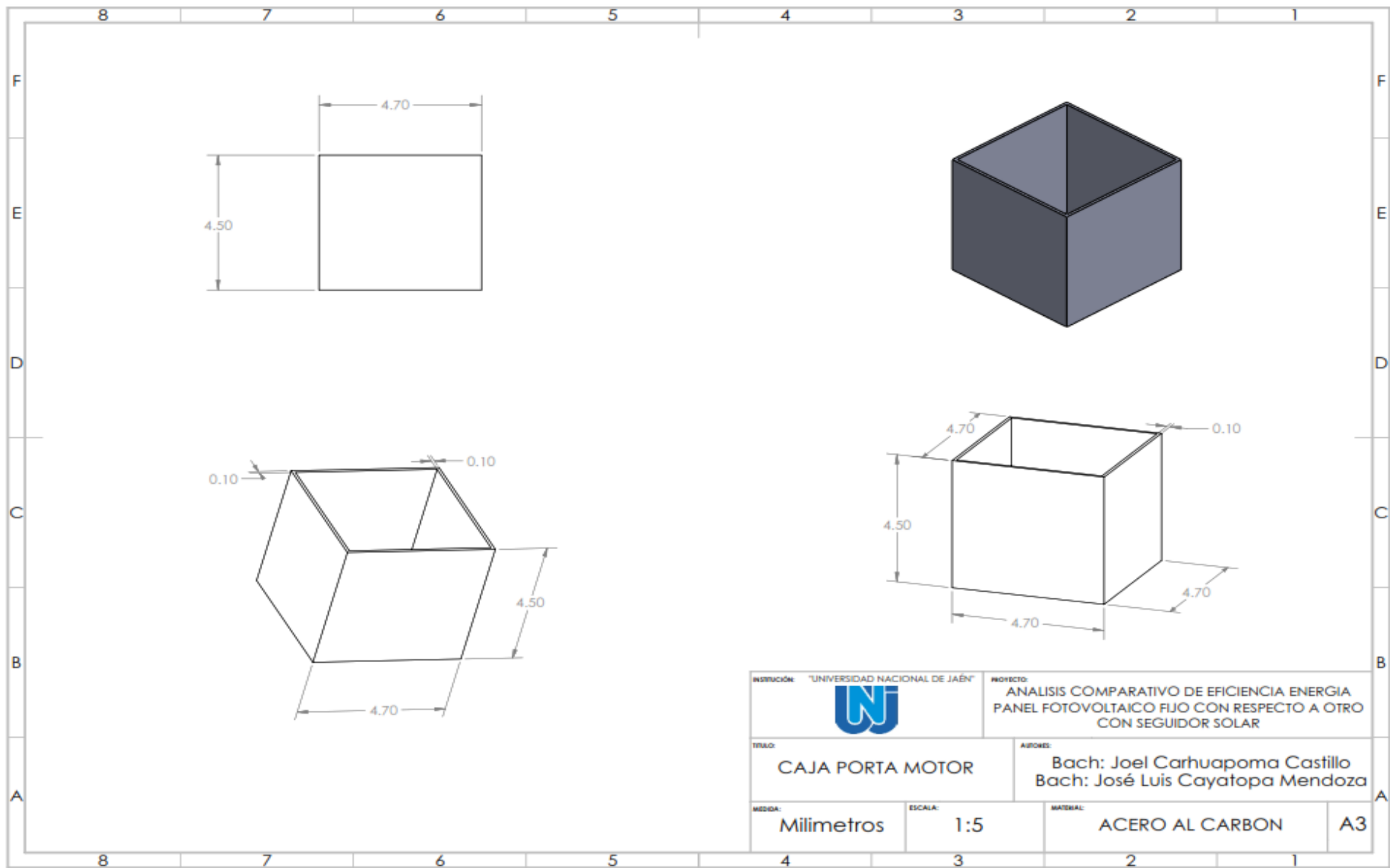


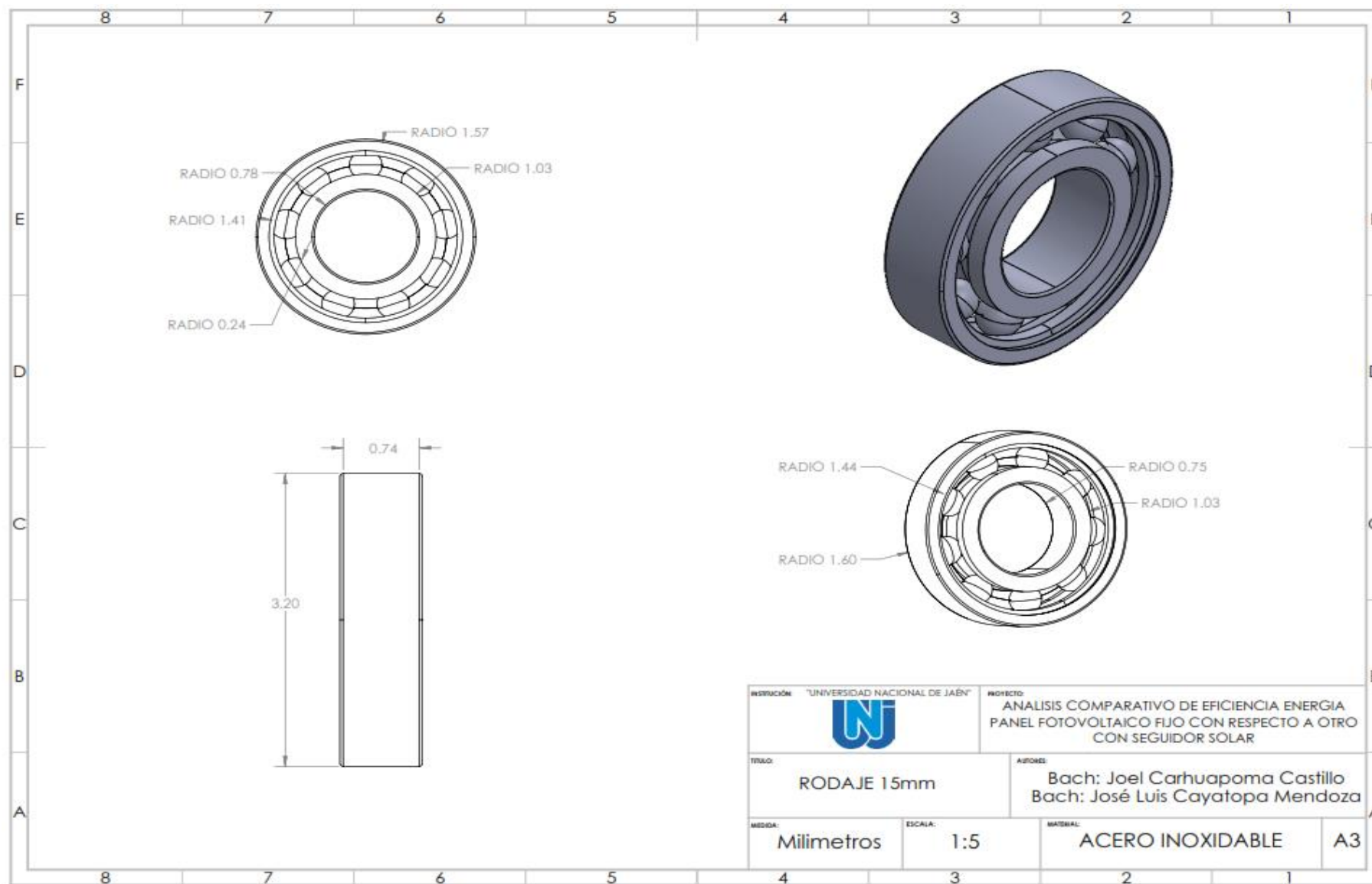


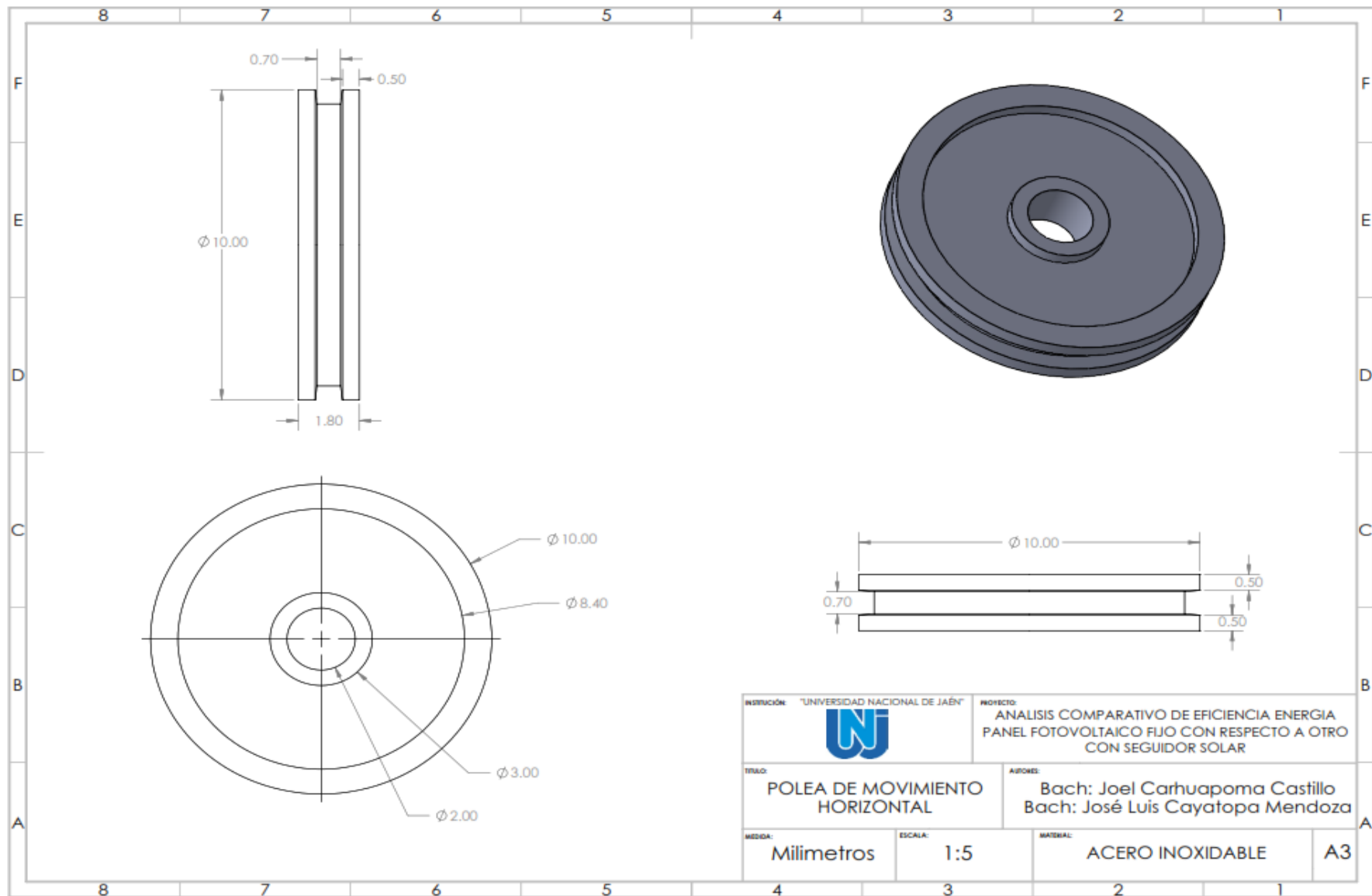


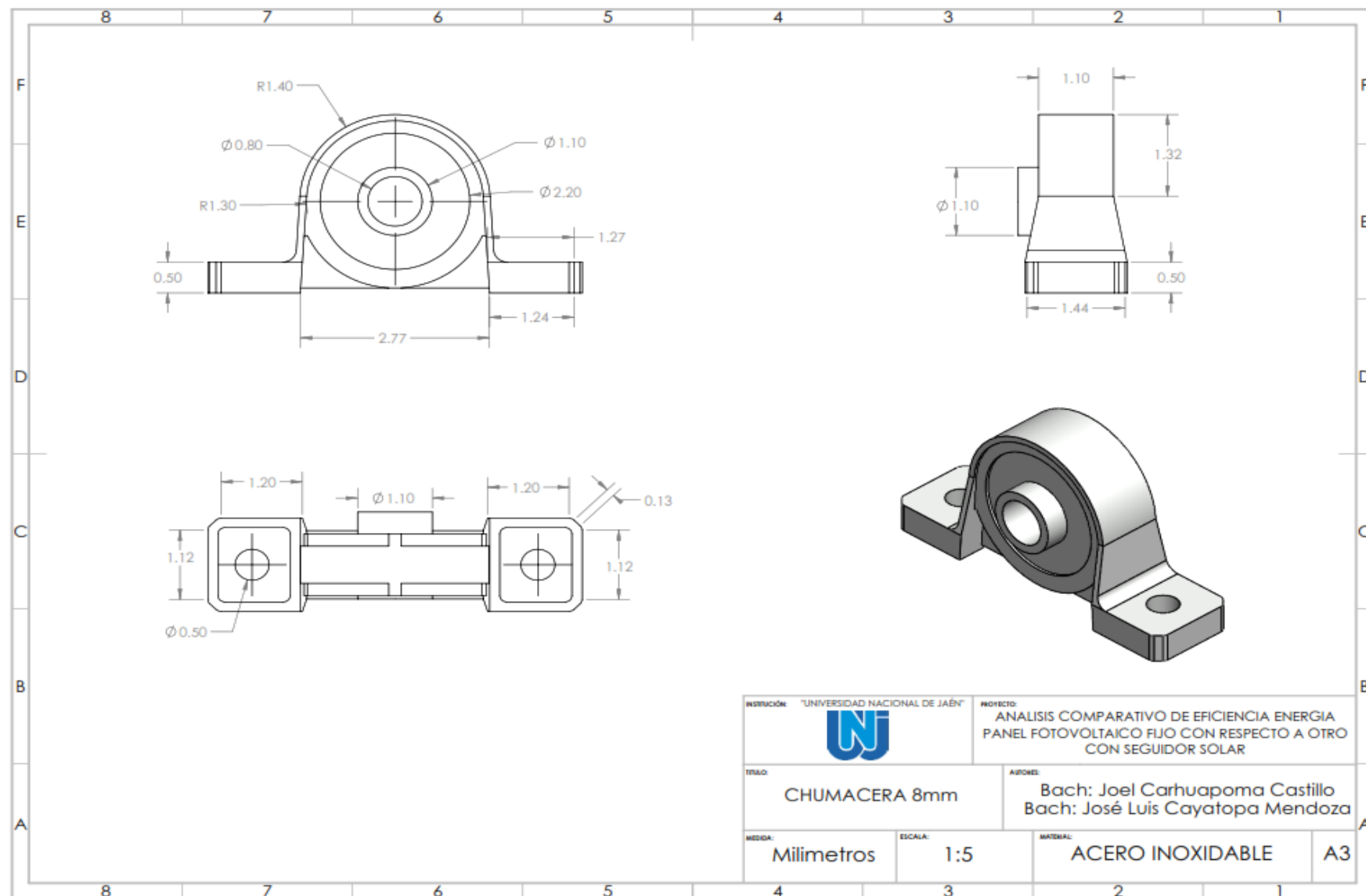


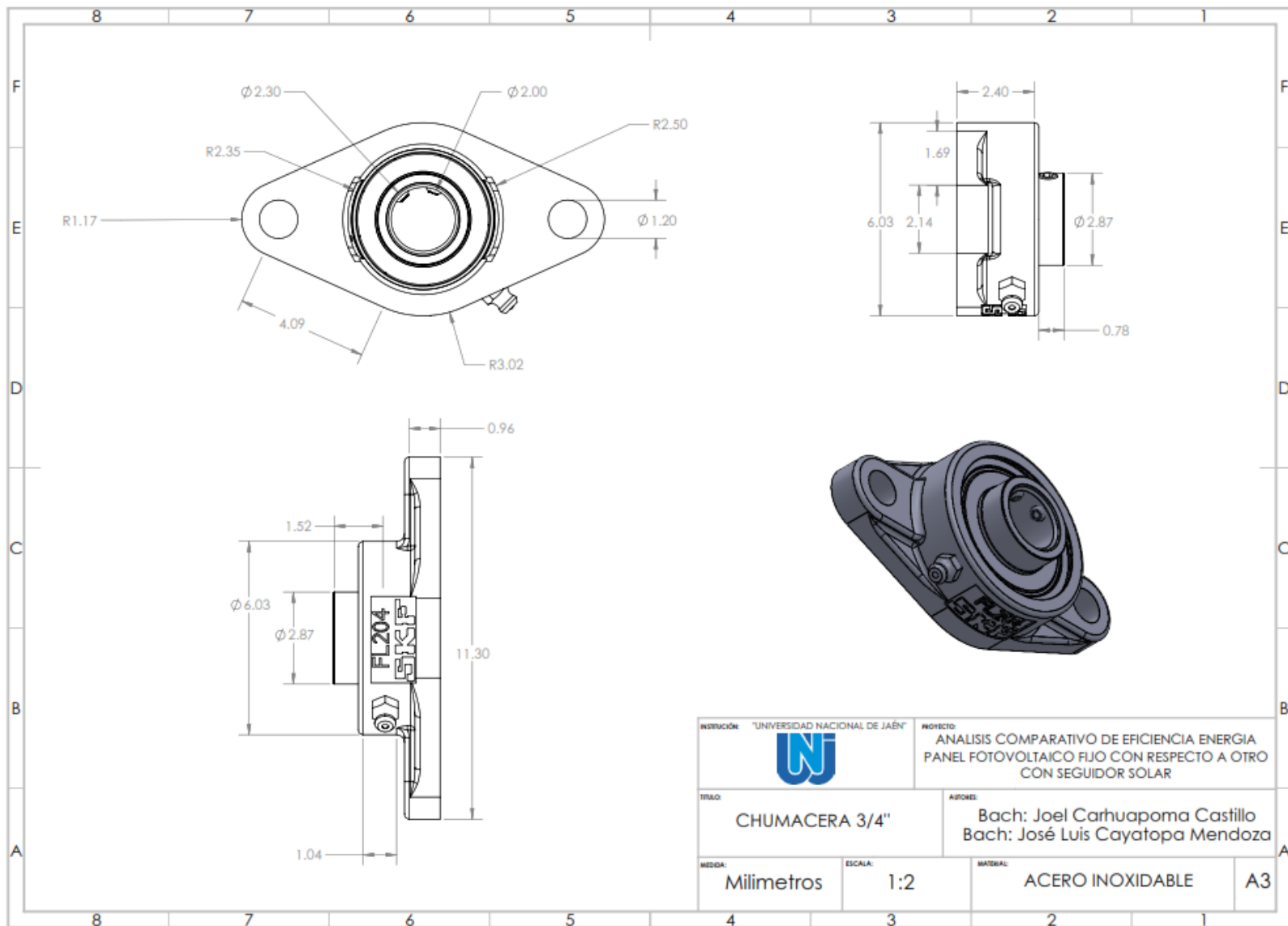


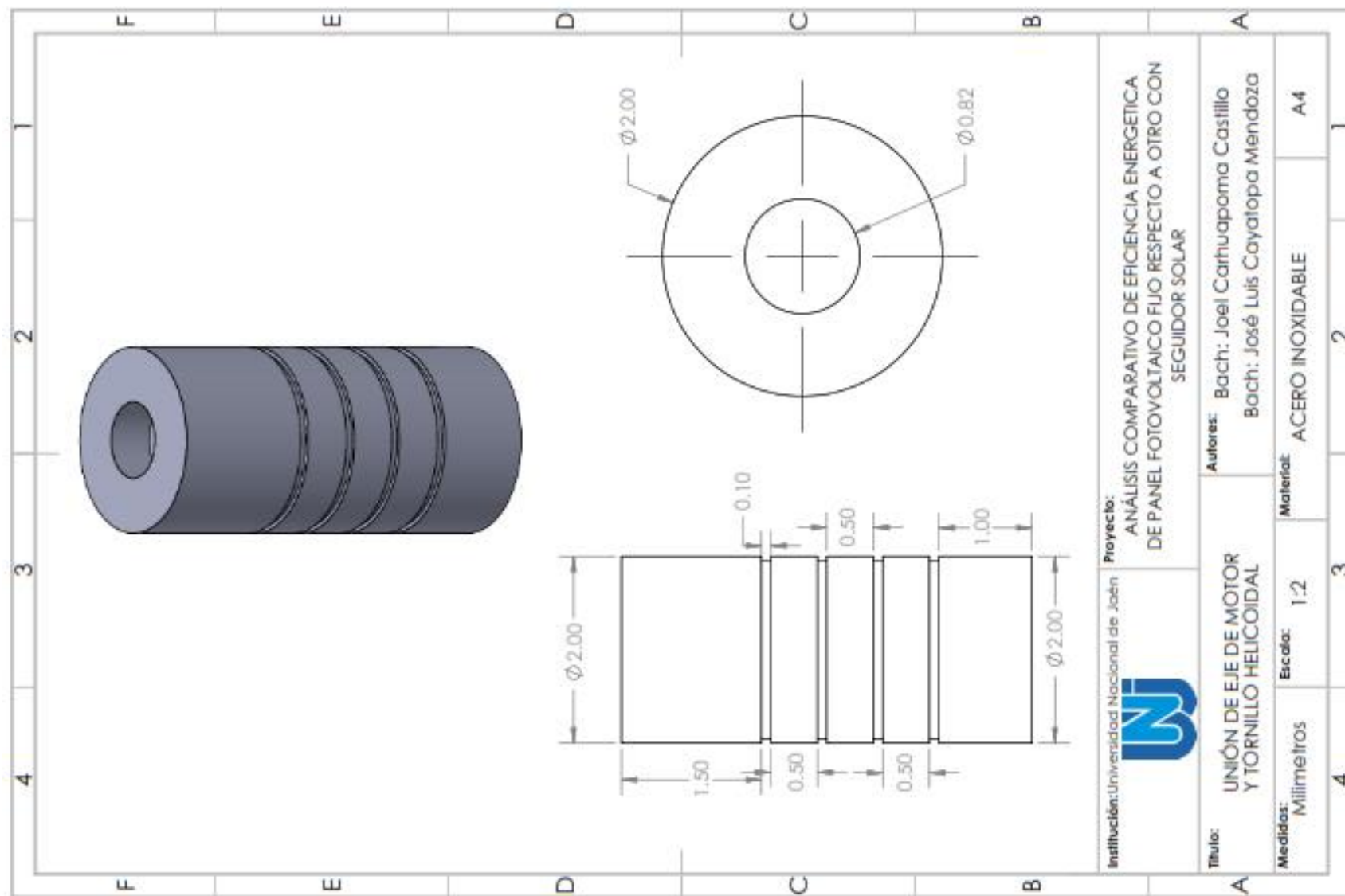


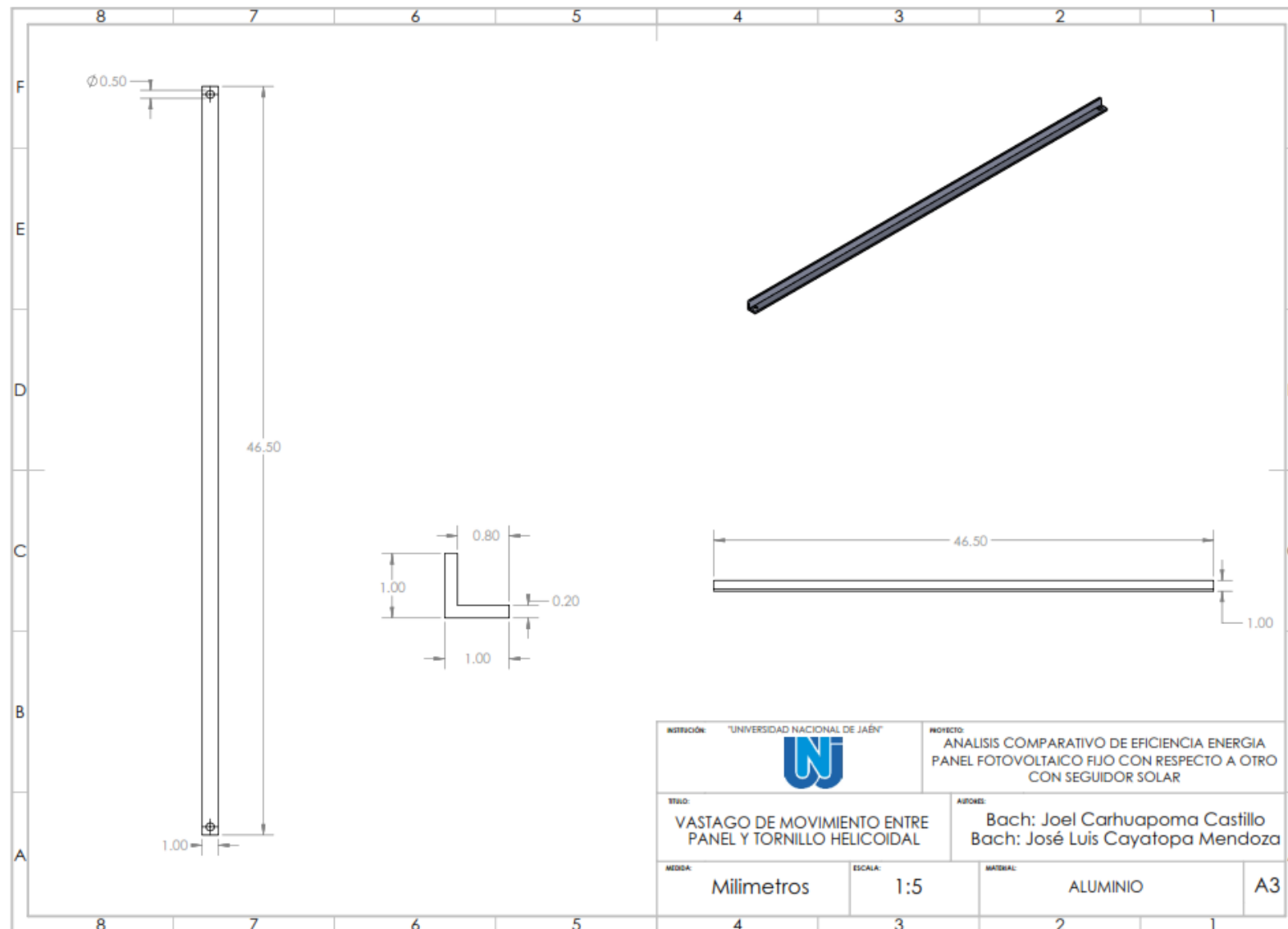


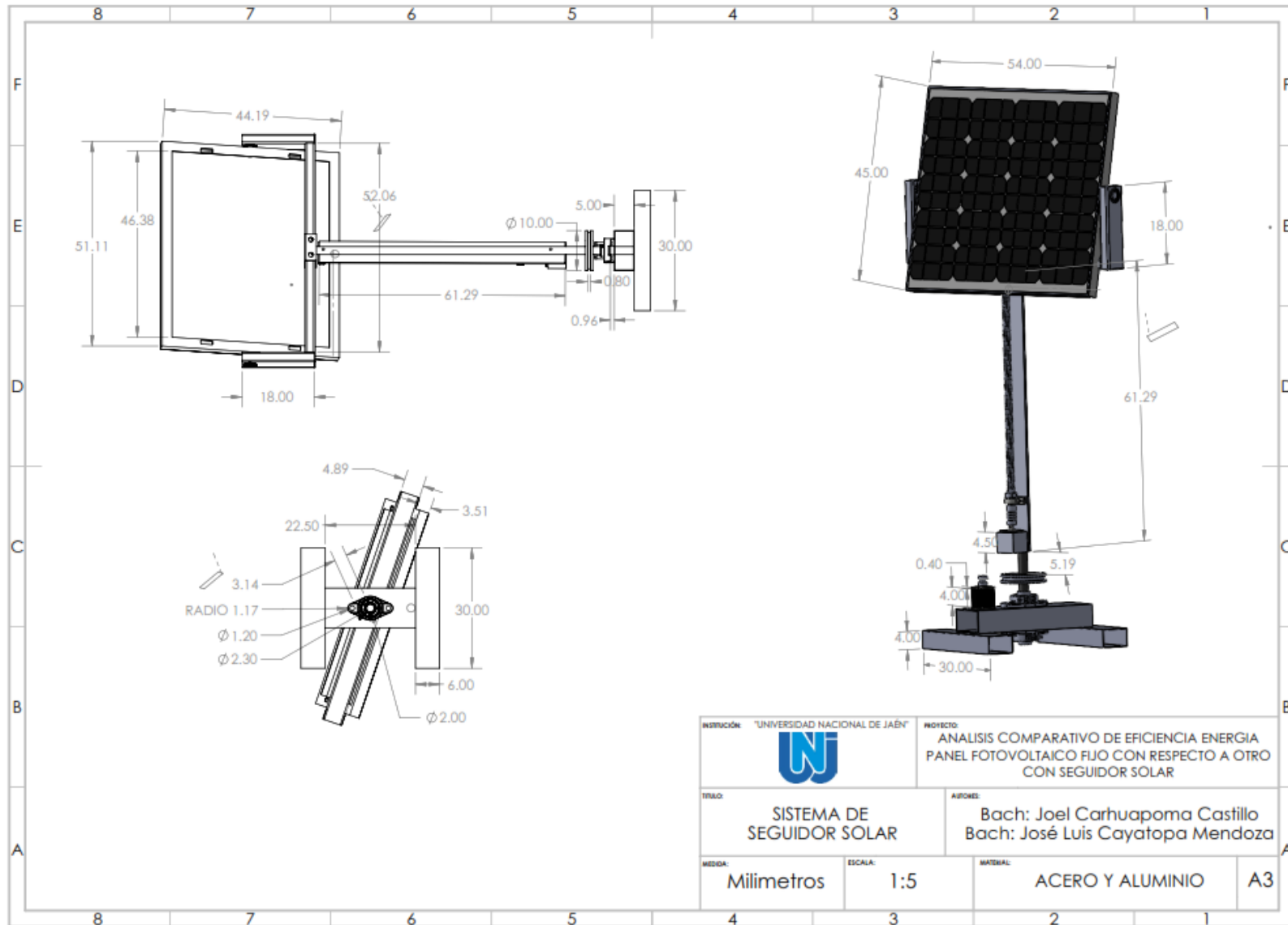












Anexo 4 Librería de posición solar (SPA.h Y SPA.C)

Algoritmo de Posición Solar (SPA.h)

```
1  //////////////////////////////////////
2  // ARCHIVO DE ENCABEZADO para SPA.C //
3  // //
4  // Algoritmo de Posición Solar (SPA) //
5  // para //
6  // Aplicación de Radiación Solar //
7  // //
8  // 12 de mayo de 2003 //
9  // //
10 // Nombre de archivo: SPA.H //
11 // //
12 // Afshin Michael Andreas //
13 // afshin_andreas@nrel.gov (303)384-6383 //
14 // //
15 // Equipo de Medición e Instrumentación //
16 // Laboratorio de Investigación de Radiación Solar //
17 // Laboratorio Nacional de Energías Renovables //
18 // 1617 Cole Blvd, Golden, CO 80401 //
19 //////////////////////////////////////
20
21 //////////////////////////////////////
22 // //
23 // Uso: //
24 // //
25 // 1) En el programa de llamada, incluya este archivo de encabezado, //
26 // agregando esta línea al principio del archivo: //
```

```

27 // #include "spa.h" //
28 // //
29 // 2) En el programa de llamada, declare la estructura SPA: //
30 // spa_data spa; //
31 // //
32 // 3) Ingrese los valores de entrada requeridos en la estructura SPA //
33 // (los valores de entrada se enumeran en los comentarios a continuación) //
34 // //
35 // 4) Llame a la función de cálculo de SPA y pase la estructura SPA //
36 // (el prototipo se declara al final de este archivo de encabezado): //
37 // spa_calculate(&spa); //
38 // //
39 // Los valores de salida seleccionados (enumerados en los comentarios a continuación) se //
40 // calcularán y devolverán en la estructura SPA pasada. Salida //
41 // se basará en el código de función seleccionado de la enumeración a continuación. //
42 // //
43 // Nota: Un código de retorno distinto de cero de spa_calculate() indica que //
44 // uno de los valores de entrada no pasó las pruebas de límites simples. //
45 // Los rangos de entrada válidos y los códigos de error de retorno también se
46 // enumeran a continuación. //
47 // //
48 ///////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
49
50 #ifndef __encabezado_del_algoritmo_de_posición_solar
51 #define __encabezado_del_algoritmo_de_posición_solar
52
53
54 //enumeración de códigos de función para seleccionar las salidas finales deseadas de SPA
55 enum {
56     SPA_ZA, //calcular cenit y acimut SPA_ZA_INC, //calcular cenit, acimut e incidencia SPA_ZA_RTS,
57 //calcular cenit, acimut y valores de salida/tránsito/puesta del sol SPA_ALL, //calcular todos los valores de
58 salida de SPA
59

```

```

60     };
61
62     estructura typedef
63     {
64         //-----VALORES DE ENTRADA-----
65
66         int año; // año de 4 dígitos, rango válido: -2000 a 6000, código de error: 1 int mes; // mes de 2
67 dígitos, rango válido: 1 a 12, código de error: 2 int día; // día de 2 dígitos, rango válido: 1 a 31, código de
68 error: 3 int hora; // hora local del observador, rango válido: 0 a 24, código de error: 4 int minuto; // minuto
69 local del observador, rango válido: 0 a 59, código de error: 5 double segundo; // segundo local del observador,
70 rango válido: 0 a <60, código de error: 6 double delta_ut1; // Diferencia de fracciones de segundo entre UTC y
71 UT que se utiliza // para ajustar el UTC a la velocidad de rotación irregular de la Tierra y se deriva //
72 únicamente de la observación y se informa en este boletín: // http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat, // donde
73 delta_ut1 = DUT1 // rango válido: -1 a 1 segundo (exclusivo), código de error 17
74
75         double delta_t; // Diferencia entre el tiempo de rotación de la Tierra y el tiempo terrestre // Se
76 deriva solo de la observación y se informa en este // boletín: http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat, // donde
77 delta_t = 32.184 + (TAI-UTC) - DUT1 // rango válido: -8000 a 8000 segundos, código de error: 7
78
79         double zona horaria; // Zona horaria del observador (negativa al oeste de Greenwich) // rango válido:
80 -18 a 18 horas, código de error: 8
81
82         double longitud; // Longitud del observador (negativa al oeste de Greenwich) // rango válido: -180 a
83 180 grados, código de error: 9
84
85         latitud double ; // Latitud del observador (negativa al sur del ecuador) // rango válido: -90 a 90
86 grados, código de error: 10
87
88         double elevación; // Elevación del observador [metros] // rango válido: -6500000 o superior metros,
89 código de error: 11
90
91         double presión; // Presión local promedio anual [milibares] // rango válido: 0 a 5000 milibares, código
92 de error: 12

```

```

93
94     temperatura double ; // Temperatura local promedio anual [grados Celsius] // rango válido: -273 a 6000
95 grados Celsius, código de error: 13
96
97     pendiente double ; // Pendiente de la superficie (medida desde el plano horizontal) // rango válido: -
98 360 a 360 grados, código de error: 14
99     double   azm_rotation; // Rotación azimutal de la superficie (medida desde el sur hasta la proyección
100 de la normal de la superficie en el plano horizontal, este negativo) // rango válido: -360 a 360 grados, código
101 de error: 15
102
103     double   atmos_refract; // Refracción atmosférica al amanecer y al atardecer (0,5667 grados es típico)
104 // rango válido: -5 a 5 grados, código de error: 16
105
106     función int ; // Cambia para elegir funciones para la salida deseada (de la enumeración)
107
108     //-----VALORES DE SALIDA intermedios-----
109
110     double   jd; //Día juliano double jc; //Siglo juliano
111
112     double   jde; //Efemérides julianas día double jce; //Efemérides julianas siglo double jme; //Efemérides
113 julianas milenio
114
115     double   l; //longitud heliocéntrica de la Tierra [grados] double b; //latitud heliocéntrica de la Tierra
116 [grados] double r; //vector del radio de la Tierra [Unidades Astronómicas, UA]
117
118     double   theta; //longitud geocéntrica [grados] double beta; //latitud geocéntrica [grados]
119
120     double   x0; //elongación media (luna-sol) [grados] double x1; //anomalía media (sol) [grados] double x2;
121 //anomalía media (luna) [grados] double x3; //latitud del argumento (luna) [grados] double x4; //longitud ascendente
122 (luna) [grados]
123
124
125

```

```

126         double del_psi; //longitud de nutación [grados] double del_epsilon; //oblicuidad de nutación [grados]
127 double epsilon0; //oblicuidad media de la eclíptica [segundos de arco] double epsilon; //oblicuidad verdadera de
128 la eclíptica [grados]
129
130         double del_tau; //corrección de aberración [grados] double lamda; //longitud solar aparente [grados]
131 double nu0; //tiempo sideral medio de Greenwich [grados] double nu; //tiempo sideral de Greenwich [grados]
132
133         double alfa; //ascensión recta geocéntrica del Sol [grados] double delta; //declinación geocéntrica del
134 Sol [grados]
135
136         double h; //ángulo horario del observador [grados] double xi; //paralaje horizontal ecuatorial del
137 Sol [grados] double del_alpha; //paralaje de ascensión recta del Sol [grados] double delta_prime; //declinación
138 topocéntrica del Sol [grados] double alpha_prime; //ascensión recta topocéntrica del Sol [grados] double h_prime;
139 //ángulo horario local topocéntrico [grados]
140
141         double e0; //ángulo de elevación topocéntrico (sin corregir) [grados] double del_e; //corrección de
142 refracción atmosférica [grados] double e; //ángulo de elevación topocéntrico (corregido) [grados]
143
144         double eot; //ecuación de tiempo [minutos] double srha; //ángulo horario de salida del sol [grados]
145 double ssha; //ángulo horario de puesta del sol [grados] double sta; //altitud de tránsito solar [grados]
146
147         //-----VALORES DE SALIDA FINALES-----
148
149         double cenit; //ángulo cenital topocéntrico [grados] double azimuth_astro; //ángulo azimuthal topocéntrico
150 (hacia el oeste desde el sur) [para astrónomos] double azimuth; //ángulo azimuthal topocéntrico (hacia el este desde
151 el norte) [para navegantes y radiación solar] double incidencia; //ángulo de incidencia de la superficie [grados]
152
153         double tránsito_solar; //tiempo de tránsito solar local (o mediodía solar) [hora fraccionaria] double
154 amanecer; //tiempo de amanecer local (+/- 30 segundos) [hora fraccionaria] double atardecer; //tiempo de atardecer
155 local (+/- 30 segundos) [hora fraccionaria]
156
157     } datos_spa;
158

```

```

159 //----- Funciones de utilidad para otras aplicaciones (como SAMPA de NREL) -----
160 double deg2rad ( double grados);
161 double rad2deg ( double radianes);
162 double limit_degrees ( double grados);
163 double third_order_polynomial ( double a, double b, double c, double d, double x);
164 double geocentric_right_ascension ( double lamda, double épsilon, double beta);
165 double geocentric_declination ( double beta, double épsilon, double lamda);
166 double observer_hour_angle ( double nu, double longitud, double alfa_grados);
167 void right_ascension_parallax_and_topocentric_dec ( double latitud, double elevación,
168 double xi, double h, double delta, double * delta_alfa, double * delta_prime);
169 double topocentric_right_ascension ( double alfa_grados, double delta_alfa);
170 double topocentric_local_hour_angle ( double h, double delta_alfa);
171 double ángulo_de_elevación_topocéntrica ( double latitud, double delta_prime, double h_prime);
172 double corrección_de_refracción_atmosférica ( double presión, double temperatura,
173 double refracción_atmosférica, double e0);
174 double ángulo_de_elevación_topocéntrica_corregido ( double e0, double delta_e);
175 double ángulo_cenital_topocéntrico ( double e);
176 double ángulo_azimutal_topocéntrico_astro ( double h_prime, double latitud, double delta_prime);
177 double ángulo_azimutal_topocéntrico ( double azimut_astro);
178
179 //Calcular los valores de salida de SPA (en la estructura) en función de los valores de entrada pasados en
180 la estructura
181 int spa_calculate (spa_data * spa);
182
183 #fin

```

Algoritmo de Posición Solar (SPA.C)

```

// Algoritmo de Posición Solar (SPA) //
// para //
// Aplicación de Radiación Solar //

```

```

4      // //
5      // 12 de mayo de 2003 //
6      // //
7      // Nombre de archivo: SPA.C //
8      // //
9      // Afshin Michael Andreas //
10     // Afshin.Andreas@NREL.gov (303)384-6383 // // //
11     //
12     Laboratorio de Metrología //
13     // Laboratorio de Investigación de Radiación Solar //
14     // Laboratorio Nacional de Energías Renovables //
15     // 15013 Denver W Pkwy, Golden, CO 80401 //
16     //////////////////////////////////////
17
18     //////////////////////////////////////
19     // Consulte el archivo de encabezado SPA.H para su uso //
20     // //
21     // Este código se basa en el
22     informe técnico de NREL "Posición solar //
23     // Algoritmo para la radiación solar //
24     // Aplicación" de I. Reda y A. Andreas //
25     //////////////////////////////////////
26
27     //////////////////////////////////////
28     //
29     // AVISO
30     // Copyright (C) 2008-2011 Alliance for Sustainable Energy, LLC, Todos los derechos reservados
31     //
32     //El algoritmo de posición solar ("Software") es un código en desarrollo preparado por empleados de
33     //Alliance for Sustainable Energy, LLC, (en adelante el "Contratista"), bajo el Contrato No.
34     //DE-AC36-08GO28308 ("Contrato") con el Departamento de Energía de los EE. UU. (el "DOE"). Se ha otorgado al Gobierno
35 de los Estados Unidos, para sí mismo y para terceros que actúen en su nombre, una
36     licencia pagada, no exclusiva, irrevocable y de alcance mundial sobre el Software para reproducir, preparar
37     obras derivadas, ejecutar y exhibir públicamente. A partir de los cinco (5) años siguientes a la fecha en que se
38 obtenga del Departamento de Energía (DOE) el permiso para hacer valer los derechos de autor, y sujeto a cualquier renovación
39 posterior por cinco (5) años, se otorga al Gobierno de los Estados Unidos, para sí mismo y para terceros que actúen en su

```

40 nombre, una licencia pagada, no exclusiva, irrevocable y de alcance mundial sobre el Software para reproducir, preparar
41 obras derivadas, distribuir copias al público, ejecutar y exhibir públicamente, y para permitir que otros lo hagan. Si el
42 Contratista deja de poner a disposición este software, puede obtenerse del Centro de Software de Ciencia y Tecnología de la
43 Energía (ESTSC) de la Oficina de Información Científica y Técnica del DOE, apartado postal 1020, Oak Ridge, TN 37831-1020.
44 ESTE SOFTWARE ES PROPORCIONADO POR EL CONTRATISTA "TAL CUAL" Y SE RENUNCIA A CUALQUIER GARANTÍA EXPRESA O IMPLÍCITA,
45 INCLUIDAS, ENTRE OTRAS, LAS GARANTÍAS IMPLÍCITAS DE COMERCIABILIDAD E IDONEIDAD PARA UN FIN DETERMINADO. EN NINGÚN CASO EL
46 CONTRATISTA NI EL GOBIERNO DE LOS EE. UU. SERÁN RESPONSABLES DE DAÑOS ESPECIALES, INDIRECTOS O CONSECUENTES, NI DE NINGÚN
47 OTRO TIPO, INCLUIDAS, ENTRE OTRAS, LAS RECLAMACIONES RELACIONADAS CON LA PÉRDIDA DE DATOS O BENEFICIOS, QUE PUEDAN RESULTAR
48 DE UNA ACCIÓN CONTRACTUAL, NEGLIGENCIA U OTRA RECLAMACIÓN ILÍCITA QUE SURJA DE O EN RELACIÓN CON EL ACCESO, USO O RENDIMIENTO
49 DE ESTE SOFTWARE. El Software se proporciona únicamente para fines internos y no comerciales y no podrá redistribuirse.
50 Comuníquese con la Oficina de Comercialización y Transferencia de Tecnología de NREL //para obtener información sobre una
51 licencia comercial para usar el Software, visite: <http://midcdmz.nrel.gov/spa/> para obtener la información de contacto.
52 // //Como condición para usar el Software en una aplicación, el desarrollador de la aplicación //acuerda hacer referencia
53 al uso del Software y hacer que este Aviso sea fácilmente accesible para cualquier persona.
54 //usuario final en una pantalla de Ayuda|Acerca de o de manera equivalente. //
55
56 //////////////////////////////////////
57 // Revisado el 27 de febrero de 2004 Andreas
58 // Se agregó una comprobación de límites en las entradas y el valor de retorno para spa_calculate().
59 // Revisado el 10 de mayo de 2004 Andreas
60 // Se cambió el mínimo de comprobación de límite de temperatura de -273,15 a -273 grados C.
61 // Revisado el 17 de junio de 2004 Andreas
62 // Se corrigió un problema que causaba un amanecer/atardecer/tránsito falso en el equinoccio.
63 // Revisado el 18 de junio de 2004 Andreas
64 // Se agregó una variable de entrada de "función" que permite seleccionar las salidas deseadas.
65 // Revisado el 21-JUN-2004 Andreas
66 // Se añadieron 3 nuevos valores de salida intermedios a la estructura SPA (srha, ssha y sta).
67 // Revisado el 23-JUN-2004 Andreas
68 // Se renombraron las enumeraciones para "función" y se añadieron 2.
69 // Se evitaron las comprobaciones de límites en entradas que no se usan (según la función).
70 // Revisado el 01-SEP-2004 Andreas
71 // Se cambió una variable local de entera a doble.
72 // Revisado el 12-JUL-2005 Andreas
73 // Se puso un límite al cálculo EOT, de modo que el resultado esté entre -20 y 20.
74 // Revisado el 26-OCT-2005 Andreas
75 // Se fijó la corrección de refracción atmosférica en cero, cuando el sol está debajo del horizonte.

```

76 // Se hizo que la entrada atmos_refract fuera un requisito para todas las "funciones".
77 // Se cambió la comprobación de límites atmos_refract de +/- 10 a +/- 5 grados.
78 // Revisado 07-NOV-2006 Andreas
79 // Corregidos 3 términos periódicos terrestres en la matriz L_TERMS.
80 // Corregidos 2 términos periódicos terrestres en la matriz R_TERMS.
81 // Revisado 10-NOV-2006 Andreas
82 // Corregida una constante usada para calcular la declinación solar topocéntrica.
83 // Pon un límite en el ángulo horario del observador, por lo que el resultado está entre 0 y 360.
84 // Revisado 13-NOV-2006 Andreas
85 // Corregido el cálculo de la declinación solar topocéntrica.
86 // Convertidas todas las entradas de punto flotante en la estructura spa a dobles.
87 // Revisado 27-FEB-2007 Andreas
88 // Corrección menor hecha en cuanto a cuándo la corrección de refracción atmosférica se establece en cero.
89 // Revisado 21-ENE-2008 Andreas
90 // Cambio menor en dos declaraciones de variables.
91 // Revisado 12-ENE-2009 Andreas
92 // Cambió la comprobación del límite de zona horaria de +/-12 a +/-18 horas.
93 // Revisado el 14 de enero de 2009, Andreas
94 // Se corrigió una constante utilizada para calcular la oblicuidad media de la eclíptica.
95 // Revisado el 1 de abril de 2013, Andreas
96 // Reemplazar floor con una nueva función de enteros para mantener la coherencia del informe técnico, sin afectar los
97 resultados.
98 // Agregar prototipos de funciones de "utilidad" al archivo de encabezado para usar con SAMPA de NREL.
99 // Cambiar el nombre de 4 funciones de "utilidad" (eliminar "sol") para mayor claridad con SAMPA de NREL.
100 // Se agregó delta_ut1 como entrada obligatoria, que es la diferencia de fracciones de segundo entre UT y UTC.
101 // La hora debe ingresarse sin el ajuste de delta_ut1, en lugar de asumir que el ajuste se aplicó previamente.
102 // Revisado el 10 de julio de 2014, Andreas
103 // Se cambió el segundo en la estructura spa_data de un entero a doble para permitir fracciones de segundo
104 // Revisado el 8 de septiembre de 2014, Andreas
105 // Se corrigió la descripción de azm_rotation en el archivo de encabezado
106 // Se limitó azimuth180 a un rango de 0 a 360 grados (en lugar de -180 a 180) para la coherencia del informe técnico
107 // Se cambiaron todos los nombres de las variables de azimuth180 a azimuth_astro
108 // Se renombraron 2 funciones de "utilidad" para mantener la coherencia// ...
109
110 #include <cmath>
111 #include "spa.h"

```

```

112
113 #define PI 3.1415926535897932384626433832795028841971
114 #define SUN_RADIUS 0.26667
115
116 #define L_COUNT 6
117 #define B_COUNT 2
118 #define R_COUNT 5
119 #define Y_COUNT 63
120
121 #definir L_MAX_SUBCOUNT 64
122 #definir B_MAX_SUBCOUNT 5
123 #definir R_MAX_SUBCOUNT 40
124
125 enumeración { TERM_A,
126             TERM_B,
127             TERM_C,
128             TERM_COUNT };
129 enumeración { TERM_X0,
130             TERM_X1,
131             TERM_X2,
132             TERM_X3,
133             TERM_X4,
134             TERM_X_COUNT };
135 enumeración { TERM_PSI_A,
136             TERM_PSI_B,
137             TERM_EPS_C,
138             TERM_EPS_D,
139             TERM_PE_COUNT };
140 enumeración { JD_MENOS,
141             JD_CERO,
142             JD_MÁS,
143             JD_COUNT };
144 enumeración { TRÁNSITO SOLAR,
145             SALIDA SOLAR,
146             PUESTA SOLAR,
147             COUNT SOLAR };

```

```

148
149 #define TERMINAL_Y_COUNT TERMINAL_X_COUNT
150
151 constante int l_subcount[L_COUNT] = { 64 , 34 , 20 , 7 , 3 , 1 };
152 constante int b_subcount[B_COUNT] = { 5 , 2 };
153 constante int r_subcount[R_COUNT] = { 40 , 10 , 6 , 2 , 1 };
154
155 //////////////////////////////////////
156 /// Términos periódicos de la Tierra
157 //////////////////////////////////////
158 const double L_TERMS[L_COUNT][L_MAX_SUBCOUNT][TERM_COUNT] = { {
159     { 175347046.0 , 0 , 0 } ,
160     { 3341656.0 , 4.6692568 , 6283.07585 } ,
161     { 34894.0 , 4.6261 , 12566.1517 } ,
162     { 3497.0 , 2.7441 , 5753.3849 } ,
163     { 3418.0 , 2.8289 , 3.5231 } ,
164     { 3136.0 , 3.6277 , 77713.7715 } ,
165     { 2676.0 , 4.4181 , 7860.4194 } ,
166     { 2343.0 , 6.1352 , 3930.2097 } ,
167     { 1324.0 , 0.7425 , 11506.7698 } ,
168     { 1273.0 , 2.0371 , 529.691 } ,
169     { 1199.0 , 1.1096 , 1577.3435 } ,
170     { 990 , 5.233 , 5884.927 } ,
171     { 902 , 2.045 , 26.298 } ,
172     { 857 , 3.508 , 398.149 } ,
173     { 780 , 1.179 , 5223.694 } ,
174     { 753 , 2.533 , 5507.553 } ,
175     { 505 , 4.583 , 18849.228 } ,
176     { 492 , 4.205 , 775.523 } ,
177     { 357 , 2.92 , 0.067 } ,
178     { 317 , 5.849 , 11790.629 } ,
179     { 284 , 1.899 , 796.298 } ,
180     { 271 , 0.315 , 10977.079 } ,
181     { 243 , 0.345 , 5486.778 } ,
182     {
183 4.806 , 2544.314 } ,

```

206

```

184      { 205 , 1.869 , 5573.143 },
185      { 202 , 2.458 , 6069.777 },
186      { 156 , 0.833 , 213.299 },
187      { 132 , 3.411 , 2942.463 },
188      { 126 , 1.083 , 20.775 },
189      { 115 , 0.645 , 0.98 },
190      { 103 , 0.636 , 4694.003 },
191      { 102 , 0.976 , 15720.839 },
192      { 102 , 4.267 , 7.114 },
193      { 99 , 6.21 , 2146.17 },
194      { 98 , 0.68 , 155.42 },
195      { 86 , 5.98 , 161000.69 },
196      { 85 , 1.3 , 6275.96 },
197      { 85 , 3.67 , 71430.7 },
198      { 80 , 1.81 , 17260.15 },
199      { 79 , 3.04 , 12036.46 },
200      { 75 , 1.76 , 5088.63 },
201      { 74 , 3.5 , 3154.69 },
202      { 74 , 4.68 , 801.82 },
203      { 70 , 0.83 , 9437.76 },
204      { 62 , 3.98 , 8827.39 },
205      { 61 , 1.82 , 7084.9 },
206      { 57 , 2.78 , 6286.6 },
207      { 56 , 4.39 , 14143.5 },
208      { 56 , 3.47 , 6279.55 },
209      { 52 , 0.19 , 12139.55 },
210      {
211 1,33 , 1748,02 },
212      { 51 , 0,28 , 5856,48 },
213      { 49 , 0,49 , 1194,45 },
214      { 41 , 5,37 , 8429,24 },
215      { 41 , 2,4 , 19651,05 },
216      { 39 , 6,17 , 10447,39 },
217      { 37 , 6,04 , 10213,29 },
218      { 37 , 2,57 , 1059,38 },
219      { 36 , 1,71 , 2352,87 },

```

52

```

220      { 36 , 1,78 , 6812,77 },
221      { 33 , 0,59 , 17789,85 },
222      { 30 , 0,44 , 83996,85 },
223      { 30 , 2,74 , 1349,87 },
224      { 25 , 3,16 , 4690,48 } },
225      { { 628331966747,0 , 0 , 0 },
226      { 206059,0 , 2,678235 , 6283,07585 },
227      { 4303,0 , 2,6351 , 12566,1517 },
228      { 425,0 , 1,59 , 3,523 },
229      { 119,0 , 5,796 , 26,298 },
230      { 109,0 , 2,966 , 1577,344 },
231      { 93 , 2,59 , 18849,23 },
232      { 72 , 1,14 , 529,69 },
233      { 68 , 1,87 , 398,15 },
234      { 67 , 4,41 , 5507,55 },
235      { 59 , 2,89 , 5223,69 },
236      { 56 , 2,17 , 155,42 },
237      { 45 , 0,4 , 796,3 },
238
239 { 36 , 0,47 , 775,52 },
240      { 29 , 2,65 , 7,11 },
241      { 21 , 5,34 , 0,98 },
242      { 19 , 1,85 , 5486,78 },
243      { 19 , 4,97 , 213,3 },
244      { 17 , 2,99 , 6275,96 },
245      { 16 , 0,03 , 2544,31 },
246      { 16 , 1,43 , 2146,17 },
247      { 15 , 1,21 , 10977,08 },
248      { 12 , 2,83 , 1748,02 },
249      { 12 , 3,26 , 5088.63 },
250      { 12 , 5.27 , 1194.45 },
251      { 12 , 2.08 , 4694 },
252      { 11 , 0.77 , 553.57 },
253      { 10 , 1.3 , 6286.6 },
254      { 10 , 4.24 , 1349.87 },
255      { 9 , 2.7 , 242.73 },

```

```

256      { 9 , 5.64 , 951.72 },
257      { 8 , 5.3 , 2352.87 },
258      { 6 , 2.65 , 9437.76 },
259      { 6 , 4.67 , 4690.48 } },
260      { { 52919.0 , 0 , 0 },
261      { 8720.0 , 1.0721 , 6283.0758 },
262      { 309.0 , 0.867 , 12566.152 },
263      { 27 , 0.05 , 3.52 },
264      { 16 , 5.19 , 26.3 },
265      { 16 , 3.68 , 155.42 },
266      {
267 10 , 0.76 , 18849.23 },
268      { 9 , 2.06 , 77713.77 },
269      { 7 , 0.83 , 775.52 },
270      { 5 , 4.66 , 1577.34 },
271      { 4 , 1.03 , 7.11 },
272      { 4 , 3.44 , 5573.14 },
273      { 3 , 5.14 , 796.3 },
274      { 3 , 6.05 , 5507.55 },
275      { 3 , 1.19 , 242.73 },
276      { 3 , 6.12 , 529.69 },
277      { 3 , 0.31 , 398.15 },
278      { 3 , 2.28 , 553.57 },
279      { 2 , 4.38 , 5223.69 },
280      { 2 , 3.75 , 0.98 } },
281      { { 289.0 , 5.844 , 6283.076 },
282      { 35 , 0 , 0 },
283      { 17 , 5.49 , 12566.15 },
284      { 3 , 5.2 , 155.42 },
285      { 1 , 4.72 , 3.52 },
286      { 1 , 5.3 , 18849.23 },
287      { 1 , 5.97 , 242.73 } },
288      { { 114.0 , 3.142 , 0 },
289      { 8 , 4.13 , 6283.08 },
290      { 1 , 3.84 , 12566.15 } },
291      { { 1 , 3.14 , 0 } }

```

```

292     };
293     constante doble B_TERMS[B_COUNT][B_MAX_SUBCOUNT][TERM_COUNT] = {
294         { { 280.0 , 3.199 , 84334.662 } ,
295         { 102.0 , 5.422 , 5507.553 } ,
296         { 80 , 3.88 , 5223.69 } ,
297         { 44 , 3.7 , 2352.87 } ,
298         { 32 , 4 , 1577.34 } } ,
299         { { 9 , 3.9 , 5507.55 } ,
300         { 6 , 1.73 , 5223.69 } }
301     };
302     constante doble R_TERMINOS[R_CONTADOR][R_MÁXIMO_SUBCONTADOR][CONTADOR_DE_TERMINALES] = { {
303         { 100013989.0 , 0 , 0 } ,
304         { 1670700.0 , 3.0984635 , 6283.07585 } ,
305         { 13956.0 , 3.05525 , 12566.1517 } ,
306         { 3084.0 , 5.1985 , 77713.7715 } ,
307         { 1628.0 , 1.1739 , 5753.3849 } ,
308         { 1576.0 , 2.8469 , 7860.4194 } ,
309         { 925.0 , 5.453 , 11506.77 } ,
310         { 542.0 , 4.564 , 3930.21 } ,
311         { 472.0 , 3.661 , 5884.927 } ,
312         { 346.0 , 0.964 , 5507.553 } ,
313         { 329.0 , 5.9 , 5223.694 } ,
314         { 307.0 , 0.299 , 5573.143 } ,
315         { 243.0 , 4.273 , 11790.629 } ,
316         { 212.0 , 5.847 , 1577.344 } ,
317         { 186.0 , 5.022 , 10977.079 } ,
318         { 175,0 , 3,012 , 18849,228 } ,
319         { 110,0 , 5,055 , 5486,778 } ,
320         { 98 , 0,89 , 6069,78 } ,
321         { 86 , 5,69 , 15720,84 } ,
322         { 86 , 1,27 , 161000,69 } ,
323         { 65 , 0,27 , 17260,15 } ,
324         { 63 , 0,92 , 529,69 } ,
325         { 57 , 2,01 , 83996,85 } ,
326         { 56 , 5,24 , 71430,7 } ,
327

```

```

328      {          49          ,          3,25          ,          2544.31          },
329 { 47 , 2,58 , 775,52 },
330      { 45 , 5,54 , 9437,76 },
331      { 43 , 6,01 , 6275,96 },
332      { 39 , 5,36 , 4694 },
333      { 38 , 2,39 , 8827,39 },
334      { 37 , 0,83 , 19651,05 },
335      { 37 , 4,9 , 12139,55 },
336      { 36 , 1,67 , 12036,46 },
337      { 35 , 1,84 , 2942,46 },
338      { 33 , 0,24 , 7084,9 },
339      { 32 , 0,18 , 5088,63 },
340      { 32 , 1,78 , 398,15 },
341      { 28 , 1,21 , 6286,6 },
342      { 28 , 1,9 , 6279,55 },
343      { 26 , 4,59 , 10447,39 } ,
344      { { 103019,0 , 1,10749 , 6283,07585 },
345      { 1721,0 , 1,0644 , 12566,1517 },
346      { 702,0 , 3,142 , 0 },
347      { 32 , 1,02 , 18849,23 },
348      { 31 , 2,84 , 5507.55 },
349      { 25 , 1.32 , 5223.69 },
350      { 18 , 1.42 , 1577.34 },
351      { 10 , 5.91 , 10977.08 },
352      { 9 , 1.42 , 6275.96 },
353      { 9 , 0.27 , 5486.78 } },
354      { { 4359.0 , 5.7846 , 6283.0758 },
355      {          124.0          ,
356 5.579 , 12566.152 },
357      { 12 , 3.14 , 0 },
358      { 9 , 3.63 , 77713.77 },
359      { 6 , 1.87 , 5573.14 },
360      { 3 , 5.47 , 18849.23 } },
361      { { 145.0 , 4.273 , 6283.076 },
362      { 7 , 3.92 , 12566.15 } },
363      { { 4 , 2.56 , 6283.08 } }

```

```

364     };
365
366     //////////////////////////////////////
367     /// Términos periódicos para la nutación en longitud y oblicuidad
368     /// ...
369     constante int Y_TERMS[Y_COUNT][TERM_Y_COUNT] = {
370         { 0 , 0 , 0 , 0 , 1 },
371         { -2 , 0 , 0 , 2 , 2 },
372         { 0 , 0 , 0 , 2 , 2 },
373         { 0 , 0 , 0 , 0 , 2 },
374         { 0 , 1 , 0 , 0 , 0 },
375         { 0 , 0 , 1 , 0 , 0 },
376         { -2 , 1 , 0 , 2 , 2 },
377         { 0 , 0 , 0 , 2 , 1 },
378         { 0 , 0 , 1 , 2 , 2 },
379         { -2 , -1 , 0 , 2 , 2 },
380         { -2 , 0 , 1 , 0 , 0 },
381         { -2 , 0 , 0 , 2 , 1 },
382         { 0 , 0 , -1 , 2 , 2 },
383         { 2 , 0 , 0 , 0 , 0 },
384         { 0 , 0 , 1 , 0 , 1 },
385         { 2 , 0 , -1 , 2 , 2 },
386         { 0 , 0 , -1 , 0 , 1 },
387         { 0 , 0 , 1 , 2 , 1 },
388         {
389             2 , 0 , 0 },
390         { 0 , 0 , -2 , 2 , 1 },
391         { 2 , 0 , 0 , 2 , 2 },
392         { 0 , 0 , 2 , 2 , 2 },
393         { 0 , 0 , 2 , 0 , 0 },
394         { -2 , 0 , 1 , 2 , 2 },
395         { 0 , 0 , 0 , 2 , 0 },
396         { -2 , 0 , 0 , 2 , 0 },
397         { 0 , 0 , -1 , 2 , 1 },
398         { 0 , 2 , 0 , 0 , 0 },
399         { 2 , 0 , -1 , 0 , 1 },

```

```

400      { -2 , 2 , 0 , 2 , 2 },
401      { 0 , 1 , 0 , 0 , 1 },
402      { -2 , 0 , 1 , 0 , 1 },
403      { 0 , -1 , 0 , 0 , 1 },
404      { 0 , 0 , 2 , -2 , 0 },
405      { 2 , 0 , -1 , 2 , 1 },
406      { 2 , 0 , 1 , 2 , 2 },
407      { 0 , 1 , 0 , 2 , 2 },
408      {                                -2                                1                                1
409 , 0 , 0 },,
410      { 0 , -1 , 0 , 2 , 2 },
411      { 2 , 0 , 0 , 2 , 1 },
412      { 2 , 0 , 1 , 0 , 0 },
413      { -2 , 0 , 2 , 2 , 2 },
414      { -2 , 0 , 1 , 2 , 1 },
415      { 2 , 0 , -2 , 0 , 1 },
416      { 2 , 0 , 0 , 0 , 1 },
417      { 0 , -1 , 1 , 0 , 0 },
418      { -2 , -1 , 0 , 2 , 1 },
419      { -2 , 0 , 0 , 0 , 1 },
420      { 0 , 0 , 2 , 2 , 1 },
421      { -2 , 0 , 2 , 0 , 1 },
422      { -2 , 1 , 0 , 2 , 1 },
423      { 0 , 0 , 1 , -2 , 0 },
424      { -1 , 0 , 1 , 0 , 0 },
425      { -2 , 1 , 0 , 0 , 0 },
426      { 1 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 },
427      { 0 , 0 , 1 , 2 , 0 },
428      {                                0                                ,                                ,                                -2                                ,
429 2 , 2 },,
430      { -1 , -1 , 1 , 0 , 0 },
431      { 0 , 1 , 1 , 0 , 0 },
432      { 0 , -1 , 1 , 2 , 2 },
433      { 2 , -1 , -1 , 2 , 2 },
434      { 0 , 0 , 3 , 2 , 2 },
435      { 2 , -1 , 0 , 2 , 2 },

```

```

436     };
437
438     constante doble PE_TERMS[Y_COUNT][TERM_PE_COUNT] = {
439         { -171996 , -174.2 , 92025 , 8.9 },
440         { -13187 , -1.6 , 5736 , -3.1 },
441         { -2274 , -0.2 , 977 , -0.5 },
442         { 2062 , 0.2 , -895 , 0.5 },
443         { 1426 , -3.4 , 54 , -0.1 },
444         { 712 , 0.1 , -7 , 0 },
445         { -517 , 1.2 , 224 , -0.6 },
446         { -386 , -0.4 , 200 , 0 },
447         { -301 , 0 , 129 , -0.1 },
448         { 217 , -0.5 , -95 , 0.3 },
449         { -158 , 0 , 0 , 0 },
450         { 129 , 0.1 , -70 , 0 },
451         { 123 , 0 , -53 , 0 },
452         { 63 , 0 , 0 , 0 },
453         { 63 , 0.1 , -33 , 0 },
454         { -59 , 0 , 26 , 0 },
455         { -58 , -0.1 , 32 , 0 },
456         { -51 , 0 , 27 , 0 },
457         { 48 , 0 , 0 , 0 },
458         { 46 , 0 , -24 , 0 },
459         { -38 , 0 , 16 , 0 },
460         {
461             , 13 , 0 },
462         { 29 , 0 , 0 , 0 },
463         { 29 , 0 , -12 , 0 },
464         { 26 , 0 , 0 , 0 },
465         { -22 , 0 , 0 , 0 },
466         { 21 , 0 , -10 , 0 },
467         { 17 , -0.1 , 0 , 0 },
468         { 16 , 0 , -8 , 0 },
469         { -16 , 0.1 , 7 , 0 },
470         { -15 , 0 , 9 , 0 },
471         { -13 , 0 , 7 , 0 },

```

-31

,

0

```

472     { -12 , 0 , 6 , 0 },
473     { 11 , 0 , 0 , 0 } ,
474     { -10 , 0 , 5 , 0 } ,
475     { -8 , 0 , 3 , 0 } ,
476     { 7 , 0 , -3 , 0 } ,
477     { -7 , 0 , 0 , 0 },
478     { -7 , 0 , 3 , 0 } ,
479     { -7 , 0 , 3 , 0 }
480     ,
481     { 6 , 0 , 0 , 0 }
482     , { 6 , 0 , -3 , 0 }
483     , { -6 , 0 , 3 , 0 } ,
484     {
485 3 , 0 },
486     { 5 , 0 , 0 , 0 },
487     { -5 , 0 , 3 , 0 },
488     { -5 , 0 , 3 , 0 },
489     { -5 , 0 , 3 , 0 },
490     { 4 , 0 , 0 , 0 },
491     { 4 , 0 , 0 , 0 },
492     { 4 , 0 , 0 , 0 },
493     { -4 , 0 , 0 , 0 },
494     { -4 , 0 , 0 , 0 },
495     { -4 , 0 , 0 , 0 },
496     { 3 , 0 , 0 , 0 },
497     { -3 , 0 , 0 , 0 },
498     { -3 , 0 , 0 , 0 },
499     { -3 , 0 , 0 , 0 },
500     { -3 , 0 , 0 , 0 },
501     { -3 , 0 , 0 , 0 },
502     { -3 , 0 , 0 , 0 },
503     { -3 , 0 , 0 , 0 },
504 };
505 ////////////////////////////////////////////
506 double rad2deg ( double radians) {
507     return ( 180.0 / PI) * radians;

```

```

508     }
509
510     double deg2rad ( double grados) {
511         return (PI / 180.0 ) * grados;
512     }
513     int entero ( valor double ) {
514         valor de retorno ;
515     }
516     double límite_grados ( double grados) {
517         double limitado;
518
519         grados /= 360.0 ;
520         limitado = 360.0 * (grados - piso(grados));
521         si (limitado < 0 ) limitado += 360.0 ;
522
523         retorno limitado;
524     }
525     double límite_grados180pm ( double grados) {
526         double limitado;
527
528         grados /= 360.0 ;
529         limitado = 360.0 * (grados - piso(grados));
530         si (limitado < -180.0 ) limitado += 360.0 ;
531         de lo contrario si (limitado > 180.0 ) limitado -= 360.0 ;
532         retorno limitado;
533     }
534     double límite_grados180 ( double grados) {
535         double limitado;
536
537         grados /= 180.0 ;
538         limitado = 180.0 * (grados - piso(grados));
539         si (limitado < 0 ) limitado += 180.0 ;
540
541         retorno limitado;
542     }
543

```



```

580      si ((spa -> segundo > 0 )) return 6 ;
581 24 ) && (spa -> segundo > 0 )) return 6 ;
582
583      si (fabs(spa -> delta_t) > 8000 ) devuelve 7 ;
584      si (fabs(spa -> zona horaria) > 18 ) devuelve 8 ;
585      si (fabs(spa -> longitud) > 180 ) devuelve 9 ;
586      si (fabs(spa -> latitud) > 90 ) devuelve 10 ;
587      si (fabs(spa -> atmos_refract) > 5 ) devuelve 16 ;
588      si (spa -> elevación < -6500000 ) devuelve 11 ;
589
590      si ((spa -> función == SPA_ZA_INC) || (spa -> función == SPA_ALL)) {
591      si (fabs(spa -> pendiente) > 360 ) devuelve 14 ;
592      si (fabs(spa -> rotación_azm) > 360 ) devuelve 15 ;
593      }
594      devuelve 0 ;
595  }
596  ///
597  ...
598      day_decimal = día + (hora - tz + (minuto + (segundo + dut1) / 60.0 ) / 60.0 ) / 24.0 ;
599      si (mes < 3 ) {
600      mes += 12 ;
601      año -- ;
602      }
603      julian_day = entero( 365.25 * (año + 4716.0 )) + entero( 30.6001 * (mes + 1 )) + día_decimal - 1524.5 ;
604
605      si (julian_day > 2299160.0 ) {
606      a = entero(año / 100 );
607      julian_day += ( 2 - a + entero(a / 4 ));
608      }
609      devolver dia_juliano;
610  }
611
612  doble julian_century ( doble jd) {
613      return (jd - 2451545.0 ) / 36525.0 ;
614  }
615  doble julian_ephemeris_day ( doble jd, doble delta_t) {

```

```

616     return jd + delta_t / 86400.0 ;
617 }
618
619 doble julian_ephemeris_century ( doble jde) {
620     retorno (jde - 2451545.0 ) / 36525.0 ;
621 }
622 doble juliano_efemérides_milenio ( doble jce) {
623     return (jce / 10.0 );
624 }
625 doble suma_periódica_de_términos_terrestres ( const doble términos[][TERM_COUNT], int recuento, doble jme) {
626     int i;
627     doble suma = 0 ;
628
629     para (i = 0 ; i < conteo; i ++ )
630         suma += términos[i][TERM_A] * cos (términos[i][TERM_B] + términos[i][TERM_C] * jme);
631
632     devuelve suma;
633 }
634
635 doble valores_tierra ( doble suma_término[], int recuento, doble jme) {
636     int i;
637     doble suma = 0 ;
638
639     para (i = 0 ; i < count; i ++ )
640         suma += term_sum[i] * pow (jme, i);
641
642     suma /= 1.0e8 ;
643
644     devuelve suma;
645 }
646
647 doble longitud_heliocéntrica_terrestre ( doble jme) {
648     doble suma[L_COUNT];
649     int i;
650
651     para (i = 0 ; i < L_COUNT; i ++ )

```

```

652     suma[i] = suma_de_términos_periódicos_terrestre(L_TERMS[i], l_subcount[i], jme);
653
654     devolver límite_degrados(rad2deg(valores_tierra(suma, L_COUNT, jme)));
655 }
656
657 double latitud_heliocéntrica_terrestre ( double jme) {
658     double suma[B_COUNT];
659     int i;
660
661     para (i = 0 ; i < B_COUNT; i ++ )
662     suma[i] = suma_de_términos_periódicos_terrestre(B_TERMS[i], b_subcount[i], jme);
663
664     devuelve rad2deg(valores_tierra(suma, B_COUNT, jme));
665 }
666
667 double vector de radio terrestre ( double jme) {
668     double suma[R_COUNT];
669     int i;
670
671     para (i = 0 ; i < R_COUNT; i ++ )
672     suma[i] = suma_de_términos_periódicos_terrestre(R_TERMS[i], r_subcount[i], jme);
673
674     devolver valores_tierra(suma, R_COUNT, jme);
675 }
676
677 double longitud_geocéntrica ( double l) {
678     double theta = l + 180.0 ;
679
680     si (theta >= 360.0 ) theta -= 360.0 ;
681
682     devuelve theta;
683 }
684
685 double latitud_geocéntrica ( double b) {
686     retorno - b;
687 }

```

```

688
689 double elongación_media_luna_sol ( double jce) {
690     devolver polinomio_de_tercer_orden( 1.0 / 189474.0 , -0.0019142 , 445267.11148 , 297.85036 , jce);
691 }
692
693 double anomalía_media_sol ( double jce) {
694     devolver polinomio_de_tercer_orden( -1.0 / 300000.0 , -0.0001603 , 35999.05034 , 357.52772 , jce);
695 }
696
697 double media_anomalía_luna ( double jce) {
698     devolver polinomio_de_tercer_orden( 1.0 / 56250.0 , 0.0086972 , 477198.867398 , 134.96298 , jce);
699 }
700
701 double argumento_latitud_luna ( double jce) {
702     devolver polinomio_de_tercer_orden( 1.0 / 327270.0 , -0.0036825 , 483202.017538 , 93.27191 , jce);
703 }
704
705 double longitud_ascendente_luna ( double jce) {
706     devolver polinomio_de_tercer_orden( 1.0 / 450000.0 , 0.0020708 , -1934.136261 , 125.04452 , jce);
707 }
708
709 double xy_término_suma ( int i, double x[TERM_X_COUNT]) {
710     int j;
711     double suma = 0 ;
712
713     para (j = 0 ; j < TERM_Y_COUNT; j ++ )
714         suma += x[j] * Y_TERMS[i][j];
715
716     devuelve suma;
717 }
718
719 void nutación_longitud_y_oblicuidad ( double jce, double x[TERM_X_COUNT], double * del_psi,
720     double * del_epsilon) {
721     int i;
722     double xy_término_suma, suma_psi = 0 , suma_epsilon = 0 ;
723

```

```

724     para (i = 0 ; i < Y_COUNT; i ++ ) {
725         suma_término_xy = deg2rad(suma_término_xy(i, x));
726         suma_psi += (PE_TERMS[i][TERM_PSI_A] + jce * PE_TERMS[i][TERM_PSI_B]) * sin (suma_término_xy);
727         suma_épsilon += (PE_TERMS[i][TERM_EPS_C] + jce * PE_TERMS[i][TERM_EPS_D]) * cos (suma_término_xy);
728     }
729
730     * del_psi = suma_psi / 36000000.0 ;
731     * del_epsilon = suma_epsilon / 36000000.0 ;
732 }
733
734 doble oblicuidad media eclíptica ( doble jme) {
735     doble u = jme / 10.0 ;
736
737     devolver 84381.448 + u * ( -4680.93 + u * ( -1.55 + u * ( 1999.25 + u * ( -51.38 + u * ( -249.67 + u * ( -39.05 +
738 u * ( 7.12 + u * ( 27.87 + u * ( 5.79 + u * 2.45 ))))))))));
739 }
740
741 doble oblicuidad verdadera eclíptica ( doble delta_epsilon, doble epsilon0) {
742     devolver delta_epsilon + epsilon0 / 3600.0 ;
743 }
744
745 doble corrección de aberración ( doble r) {
746     devolver -20.4898 / ( 3600.0 * r);
747 }
748
749 doble longitud solar aparente ( doble theta, doble delta_psi, doble delta_tau) {
750     devolver theta + delta_psi + delta_tau;
751 }
752
753 doble tiempo sidereal medio de greenwich ( doble jd, doble jc) {
754     devolver límite_degrados( 280.46061837 + 360.98564736629 * (jd - 2451545.0 ) + jc * jc * ( 0.000387933 - jc /
755 38710000.0 ));
756 }
757
758 doble tiempo sidereal de greenwich ( doble nu0, doble delta_psi, doble épsilon) {
759     devolver nu0 + delta_psi * cos (deg2rad(épsilon));

```

```

760     }
761
762     double ascensión recta geocéntrica ( double lamda, double épsilon, double beta) {
763         double lamda_rad = deg2rad(lamda);
764         double épsilon_rad = deg2rad(épsilon);
765
766         return limit_grados(rad2deg(atan2( sin (lamda_rad) * cos (epsilon_rad) - tan (deg2rad(beta)) * sin (epsilon_rad),
767 cos (lamda_rad))));
768     }
769
770     double declinación geocéntrica ( double beta, double épsilon, double lamda) {
771         double beta_rad = deg2rad(beta);
772         double épsilon_rad = deg2rad(épsilon);
773
774         return rad2deg(asin( sin (beta_rad) * cos (epsilon_rad) + cos (beta_rad) * sin (epsilon_rad) * sin
775 (deg2rad(lamda))));
776     }
777
778     double ángulo horario del observador ( double nu, double longitud, double alpha_deg) {
779         return limit_degrees(nu + longitud - alpha_deg);
780     }
781
782     double paralaje horizontal ecuatorial solar ( double r) {
783         devolver 8.794 / ( 3600.0 * r);
784     }
785
786     void paralaje_de_ascensión_recta_y_dec_topocéntrico_ ( double latitud, double elevación,
787 double xi, double h, double delta, double * delta_alfa, double * delta_prima) {
788         double delta_alfa_rad;
789         double lat_rad = grados2rad(latitud);
790         double xi_rad = grados2rad(xi);
791         double h_rad = grados2rad(h);
792         double delta_rad = grados2rad(delta);
793         double u = atan( 0,99664719 * tan (lat_rad));
794         double y = 0,99664719 * seno (u) + elevación * seno (lat_rad) / 6378140,0 ;
795         double x = coseno (u) + elevación * coseno (lat_rad) / 6378140,0 ;

```

```

796
797     delta_alpha_rad = atan2( - x * sen (xi_rad) * sen (h_rad),
798     cos (delta_rad) - x * sen (xi_rad) * cos (h_rad));
799
800     * delta_prime = rad2deg(atan2(( sen (delta_rad) - y * sen (xi_rad)) * cos (delta_alpha_rad),
801     cos (delta_rad) - x * sen (xi_rad) * cos (h_rad)));
802
803     * delta_alpha = rad2deg(delta_alpha_rad);
804 }
805
806 doble ascensión_recta_topocéntrica ( doble alfa_grados, doble delta_alfa) {
807     devolver alfa_grados + delta_alfa;
808 }
809
810 doble ángulo_horario_local_topocéntrico ( doble h, doble delta_alpha) {
811     devolver h - delta_alpha;
812 }
813
814 ángulo_de_elevación_topocéntrico_doble ( latitud_doble , delta_prime_doble , h_prime_doble ) {
815     lat_rad_doble = deg2rad(latitud);
816     delta_prime_rad_doble = deg2rad ( delta_prime_doble) ;
817
818     devuelve rad2deg(asin( sen (lat_rad) * sen (delta_prime_rad) + cos (lat_rad) * cos (delta_prime_rad) * cos
819 (deg2rad(h_prime)))));
820 }
821
822 doble corrección_de_refracción_atmosférica ( doble presión, doble temperatura,
823     doble refracción_atmosférica, doble e0) {
824     doble del_e = 0 ;
825
826     si (e0 >= -1 * (RADIO_SOL + refracción_atmósfera))
827     del_e = (presión / 1010.0 ) * ( 283.0 / ( 273.0 + temperatura)) * 1.02 / ( 60.0 * tan (deg2rad(e0 + 10.3 / (e0 +
828 5.11 ))));
829
830     devolver del_e;
831 }

```

```

832
833 ángulo de elevación topocéntrico doble corregido ( doble e0, doble delta_e) {
834     devolver e0 + delta_e;
835 }
836
837 doble ángulo cenital topocéntrico ( doble e) {
838     devolver 90.0 - e;
839 }
840
841 doble ángulo azimutal topocéntrico astro ( doble h_prime, doble latitud, doble delta_prime) {
842     doble h_prime_rad = deg2rad(h_prime);
843     doble lat_rad = deg2rad(latitud);
844
845     devuelve límite_grados(rad2deg(atan2( sin (h_prime_rad),
846     cos (h_prime_rad) * sin (lat_rad) - tan (deg2rad(delta_prime)) * cos (lat_rad))));
847 }
848
849 doble ángulo azimutal topocéntrico ( doble azimut_astro) {
850     return límite_grados(azimut_astro + 180.0 );
851 }
852
853 ángulo de incidencia de superficie doble ( doble cenit, doble azimut astro, doble rotación azm,
854     doble pendiente) {
855     doble zenit_rad = deg2rad(cenit);
856     doble pendiente_rad = deg2rad(pendiente);
857
858     devuelve rad2deg(acos( cos (rad_cenital) * cos (rad_pendiente) + sin (rad_pendiente) * sin (rad_cenital) * cos
859 (deg2rad(astro_azimut - rotación_azm))));
860 }
861
862 doble sun_mean_longitude ( doble jme) {
863     return límite_grados( 280.4664567 + jme * ( 360007.6982779 + jme * ( 0.03032028 + jme * ( 1 / 49931.0 + jme * ( -1
864 / 15300.0 + jme * ( -1 / 2000000,0 ))))));
865 }
866
867 doble eot ( doble m, doble alfa, doble del_psi, doble épsilon) {

```

```

868     devolver límite_minutos( 4.0 * (m - 0.0057183 - alfa + del_psi * cos (deg2rad(epsilon))));
869 }
870
871 doble aprox_tiempo_de_tránsito_solar ( doble alfa_cero, doble longitud, doble nu) {
872     return (alfa_cero - longitud - nu) / 360.0 ;
873 }
874
875 doble ángulo_horario_solar_al_salir_y_ponerse ( doble latitud, doble delta_cero, doble h0_prime) {
876     doble h0 = -99999 ;
877     doble latitud_rad = deg2rad(latitud);
878     doble delta_cero_rad = deg2rad(delta_cero);
879     doble argumento = ( sin (deg2rad(h0_prime)) - sin (latitud_rad) * sin (delta_cero_rad)) / ( cos (latitud_rad) * cos
880 (delta_cero_rad));
881
882     si (fabs(argumento) <= 1 ) h0 = limit_degrees180(rad2deg(acos(argumento)));
883
884     devolver h0;
885 }
886
887 void aprox_salida_y_puesta_del_sol ( doble * m_rts, doble h0) {
888     doble h0_dfrac = h0 / 360.0 ;
889
890     m_rts[SALIDA_SOL] = límite_cero2uno(m_rts[TRÁNSITO_SOL] - h0_dfrac);
891     m_rts[PUESTA_SOL] = límite_cero2uno(m_rts[TRÁNSITO_SOL] + h0_dfrac);
892     m_rts[TRÁNSITO_SOL] = límite_cero2uno(m_rts[TRÁNSITO_SOL]);
893 }
894
895 doble rts_alpha_delta_prime ( doble * anuncio, doble n) {
896     doble a = anuncio[JD_CERO] - anuncio[JD_MENOS];
897     doble b = anuncio[JD_MÁS] - anuncio[JD_CERO];
898
899     si (fabs(a) >= 2.0 ) a = limit_zero2one(a);
900     si (fabs(b) >= 2.0 ) b = limit_zero2one(b);
901
902     devuelve ad[JD_ZERO] + n * (a + b + (b - a) * n) / 2.0 ;
903 }

```

```

904
905     double rts_sun_altitude ( double latitud, double delta_prime, double h_prime) {
906         double latitud_rad = deg2rad(latitud);
907         double delta_prime_rad = deg2rad(delta_prime);
908
909         devuelve rad2deg(asin( sin (latitud_rad) * sin (delta_prime_rad) + cos (latitud_rad) * cos (delta_prime_rad) * cos
910 (deg2rad(h_prime))));
911     }
912
913     double salida_y_puesta_del_sol ( double * m_rts, double * h_rts, double * delta_prime, double latitud,
914         double * h_prime, double h0_prime, int sol) {
915         return m_rts[sol] + (h_rts[sol] - h0_prime) / ( 360.0 * cos (deg2rad(delta_prime[sol])) * cos (deg2rad(latitud)) *
916 sin (deg2rad(h_prime[sol])));
917     }
918
919     //////////////////////////////////////
920     // Calcule los parámetros SPA necesarios para obtener la ascensión recta (alfa) y la declinación (delta)
921     // Nota: JD ya debe estar calculado y en la estructura
922     //////////////////////////////////////
923     void calcular_ascensión_recta_geocéntrica_del_sol_y_declinación (spa_data * spa) {
924         double x[TERM_X_COUNT];
925
926         spa -> jc = julian_century(spa -> jd);
927
928         spa -> jde = julian_ephemeris_day(spa -> jd, spa -> delta_t);
929         spa -> jce = julian_ephemeris_century(spa -> jde);
930         spa -> jme = julian_ephemeris_millennium(spa -> jce);
931
932         spa -> l = longitud_heliocéntrica_tierra(spa -> jme);
933         spa -> b = latitud_heliocéntrica_tierra(spa -> jme);
934         spa -> r = vector_radio_tierra(spa -> jme);
935
936         spa -> theta = longitud_geocéntrica(spa -> l);
937         spa -> beta = latitud_geocéntrica(spa -> b);
938
939         x[TERM_X0] = spa -> x0 = alargamiento_medio_luna_sol(spa -> jce);

```

```

940 x[TERM_X1] = spa -> x1 = anomalía_media_sol(spa -> jce);
941 x[TERM_X2] = spa -> x2 = anomalía_media_luna(spa -> jce);
942 x[TERM_X3] = spa -> x3 = latitud_argumento_luna(spa -> jce);
943 x[TERM_X4] = spa -> x4 = longitud_ascendente_luna(spa -> jce);
944
945 nutation_longitude_and_obliquity(spa -> jce, x, & (spa -> del_psi), & (spa -> del_epsilon));
946
947 spa -> epsilon0 = oblicuidad_media_eclíptica(spa -> jme);
948 spa -> epsilon = oblicuidad_verdadera_eclíptica(spa -> del_epsilon, spa -> epsilon0);
949
950 spa -> del_tau = corrección_de_aberración(spa -> r);
951 spa -> lamda = longitud_solar_aparente(spa -> theta, spa -> del_psi, spa -> del_tau);
952 spa -> nu0 = tiempo_sidereal_medio_de_greenwich(spa -> jd, spa -> jc);
953 spa -> nu = tiempo_sidereal_de_greenwich(spa -> nu0, spa -> del_psi, spa -> epsilon);
954
955 spa -> alfa = ascensión_recta_geocéntrica(spa -> lamda, spa -> epsilon, spa -> beta);
956 spa -> delta = declinación_geocéntrica(spa -> beta, spa -> epsilon, spa -> lamda);
957 }
958
959 ////////////////////////////////////////////////////
960 // Calcular la ecuación del tiempo (EOT) y la salida, el tránsito y la puesta del sol (RTS)
961 /// ...
962
963 void calcular_eot_y_tránsito_de_salida_del_sol (spa_data * spa) {
964     spa_data sol_rts;
965     double nu, m, h0, n;
966     double alfa[JD_COUNT], delta[JD_COUNT];
967     double m_rts[SUN_COUNT], nu_rts[SUN_COUNT], h_rts[SUN_COUNT];
968     double alfa_prime[SUN_COUNT], delta_prime[SUN_COUNT], h_prime[SUN_COUNT];
969     double h0_prime = -1 * (SUN_RADIUS + spa -> atmos_refract);
970     int i;
971
972     sun_rts = * spa;
973     m = longitud_media_solar(spa -> jme);
974     spa -> eot = eot(m, spa -> alfa, spa -> del_psi, spa -> epsilon);
975

```

```

976     sun_rts.hora = sun_rts.minuto = sun_rts.segundo = 0 ;
977 sun_rts.delta_utl = sun_rts.zona horaria = 0.0 ;
978
979     sun_rts.jd = juliano_día(sun_rts.año, sun_rts.mes, sun_rts.día, sun_rts.hora,
980 sun_rts.minuto, sun_rts.segundo, sun_rts.delta_utl, sun_rts.zona horaria);
981
982     calcular_ascensión_recta_geocéntrica_del_sol_y_declinación( & sun_rts);
983     nu = sun_rts.nu;
984
985     sun_rts.delta_t = 0 ;
986 sun_rts.jd -- ;
987 para (i = 0 ; i < JD_COUNT; i ++ ) {
988     calcular_ascensión_recta_solar_geocéntrica_y_declinación( & sun_rts);
989     alfa[i] = sun_rts.alfa;
990     delta[i] = sun_rts.delta;
991     sun_rts.jd ++ ;
992 }
993
994 m_rts[TRÁNSITO SOLAR] = tiempo aproximado de tránsito solar (alfa[JD_ZERO], spa -> longitud, nu);
995 h0 = ángulo horario del sol al salir y ponerse (spa -> latitud, delta[JD_ZERO], h0_prime);
996
997 si (h0 >= 0 ) {
998
999     aprox_salida_y_puesta_del_sol(m_rts, h0);
1000
1001     para (i = 0 ; i < SUN_COUNT; i ++ ) {
1002
1003         nu_rts[i] = nu + 360.985647 * m_rts[i];
1004
1005         n = m_rts[i] + spa -> delta_t / 86400.0 ;
1006         alfa_prime[i] = rts_alfa_delta_prime(alfa, n);
1007         delta_prime[i] = rts_alfa_delta_prime(delta, n);
1008
1009         h_prime[i] = limit_degrees180pm(nu_rts[i] + spa -> longitud - alfa_prime[i]);
1010
1011         h_rts[i] = rts_sun_altitude(spa -> latitud, delta_prime[i], h_prime[i]);

```

```

1012     }
1013
1014     spa -> srha = h_prime[SALIDA_DEL_SOL];
1015     spa -> ssha = h_prime[PUESTA_DEL_SOL];
1016     spa -> sta = h_rts[TRÁNSITO_DEL_SOL];
1017
1018     spa -> suntransit = dayfrac_to_local_hr(m_rts[SUN_TRANSIT] - h_prime[SUN_TRANSIT] / 360.0 ,
1019     spa -> zona horaria);
1020
1021     spa -> amanecer = dayfrac_to_local_hr(salida_y_puesta_del_amanecer(m_rts, h_rts, delta_prime,
1022     spa -> latitud, h_prime, h0_prime, SALIDA_DEL_AMANECER),
1023     spa -> zona horaria);
1024
1025     spa -> puesta del sol = dayfrac_to_local_hr(salida_y_puesta_del_sol(m_rts, h_rts, delta_prime,
1026     spa -> latitud, h_prime, h0_prime, PUESTA_DEL_SOL),
1027     spa -> zona horaria);
1028
1029     } de lo contrario spa -> srha = spa -> ssha = spa -> sta = spa -> suntransit = spa -> amanecer = spa -> atardecer
1030 = -99999 ;
1031     }
1032
1033     //////////////////////////////////////
1034     // Calcular todos los parámetros de SPA y ponerlos en la estructura
1035     // Nota: Todos los valores de entrada (enumerados en el archivo de encabezado) ya deben estar en la estructura
1036     //////////////////////////////////////
1037     int spa_calculate (spa_data * spa) {
1038         int result;
1039
1040         resultado = validar_entradas(spa);
1041
1042         if (resultado == 0 ) {
1043             spa -> jd = julian_day(spa -> año, spa -> mes, spa -> día, spa -> hora,
1044             spa -> minuto, spa -> segundo, spa -> delta_utl, spa -> zona horaria);
1045
1046             calcular_ascensión_recta_solar_geocéntrica_y_declinación(spa);
1047

```

```

1048     spa -> h = ángulo_horario_del_observador(spa -> nu, spa -> longitud, spa -> alfa);
1049     spa -> xi = paralaje_horizontal_ecuatorial_solar(spa -> r);
1050
1051     paralaje_de_ascensión_derecha_y_dec_topocéntrico(spa -> latitud, spa -> elevación, spa -> xi,
1052                                                       spa -> h, spa -> delta, & (spa -> del_alpha), & (spa ->
1053 delta_prime));
1054
1055     spa -> alfa_prime = ascensión_recta_topocéntrica(spa -> alfa, spa -> del_alfa);
1056     spa -> h_prime = ángulo_horario_local_topocéntrico(spa -> h, spa -> del_alfa);
1057
1058     spa -> e0 = ángulo_de_elevación_topocéntrico(spa -> latitud, spa -> delta_prime, spa -> h_prime);
1059     spa -> del_e = corrección_de_refracción_atmosférica(spa -> presión, spa -> temperatura,
1060 spa -> refracción_atmosférico, spa -> e0);
1061     spa -> e = ángulo_de_elevación_topocéntrico_corregido(spa -> e0, spa -> del_e);
1062
1063     spa -> cenit = ángulo_cenital_topocéntrico(spa -> e);
1064     spa -> azimuth_astro = ángulo_azimutal_topocéntrico_astro(spa -> h_prime, spa -> latitud,
1065 spa -> delta_prime);
1066     spa -> azimuth = ángulo_azimutal_topocéntrico(spa -> azimuth_astro);
1067
1068     si ((spa -> función == SPA_ZA_INC) || (spa -> función == SPA_ALL))
1069     spa -> incidencia = ángulo_de_incidencia_superficie(spa -> cenit, spa -> azimuth_astro,
1070 spa -> rotación_azm, spa -> pendiente);
1071
1072     si ((spa -> función == SPA_ZA_RTS) || (spa -> función == SPA_ALL))
1073     calcular_tránsito_eot_y_salida_del_sol(spa);
1074 }
1075
1076     devolver resultado;
}

```

Anexo 5 Código del seguidor solar

Código principal

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3  #include <RTCLib.h>
4  #include <Adafruit_INA219.h>
5  #include "spa.h"
6  #include <cmath>
7  #include <SPI.h>
8  #include <SD.h>
9  #include <WiFi.h>
10 #include <ThingSpeak.h>
11 #include <HardwareSerial.h> // Añadido para RS485
12 #include "secrets.h"
13 // --- Debug Macro (Mantenido en 1 según última solicitud, pero las funciones auxiliares de print se eliminan) -
14 #define DEBUG 1
15 #if DEBUG
16 #define DBG_PRINT(...) Serial.print(__VA_ARGS__)
17 #define DBG_PRINTLN(...) Serial.println(__VA_ARGS__)
18 #define DBG_PRINTF(...) Serial.printf(__VA_ARGS__)
19 #else
20 #definir DBG_PRINT(...)
21 #definir DBG_PRINTLN(...)
22 #definir DBG_PRINTF(...)
23 #endif
24 // --- Configuración RS485 ---
25 #define RS485_TX_PIN 17
26 #define RS485_RX_PIN 16
27 #define RS485_EN_PIN 4
28 HardwareSerial RS485 ( 1 ); // Usar UART1 (GPIO 16, 17 por defecto en muchos ESP32)
29
30 // --- Configuración LCD ---
31 LiquidCrystal_I2C lcd ( 0x27 , 2 , 1 , 0 , 4 , 5 , 6 , 7 );
32
```

```

33 // --- Variables Globales Compartidas ---
34 volátil float g_V1 = 0.0 , g_V2 = 0.0 , g_I1 = 0.0 , g_I2 = 0.0 ;
35 volátil int g_D = 1 , g_H = 0 , g_M = 0 , g_S = 0 ;
36 volátil double g_currentAzimuth = NAN;
37 volátil double g_currentElevation = NAN;
38 volátil double g_normalizedAzimuth = 0.0 ;
39 volátil int g_isDay = 0 ;
40
41 // --- FreeRTOS maneja y Mutex ---
42 SemaphoreHandle_t xDataMutex = NULL ;
43 SemaphoreHandle_t i2cMutex = NULL ;
44 SemaphoreHandle_t sdMutex = NULL ;
45 SemaphoreHandle_t xSpaCalculationCompleteSemaphore = NULL ;
46 TaskHandle_t inaTaskHandle = NULL ;
47 TaskHandle_t spaTaskHandle = NULL ;
48 TaskHandle_t thingspeakTaskHandle = NULL ;
49 TaskHandle_t positionSenderTaskHandle = NULL ;
50
51 // --- Cliente WiFi para ThingSpeak --- Cliente
52 WiFiClient ;
53
54 // --- Variables LCD ---
55 unsigned long lastLcdFullRefresh = 0 ;
56 const unsigned long lcdFullRefreshInterval = 2 * 60 * 1000 ; // Actualizado a los 5 minutos
57 float displayed_V1 = -99.9 , displayed_V2 = -99.9 , displayed_I1 = -99.9 , displayed_I2 = -99.9 ;
58 int displayed_D = -1 , displayed_H = -1 , displayed_M = -1 , displayed_S = -1 ;
59 char tempFloatBuffer[ 8 ];
60
61
62 // --- Configuración SD ---
63 const int SD_CS_PIN = 5 ;
64 const char * DATA_FILENAME = "/sensor_log.csv" ;
65
66 // --- Objetos Sensores y RTC ---
67 RTC_DS1307 rtc;
68 Adafruit_INA219 ina219_Panel1 ( 0x41 );

```

```

69 Adafruit_INA219 ina219_Panel2 ( 0x44 );
70 spa_data spa;
71
72 // --- Constantes SPA ---
73 const double ZONA HORARIA = -5.0 ;
74 const double DELTA_UT1 = 0.0 ;
75 const double DELTA_T = 69.0 ;
76 const double LONGITUD = -78.804164 ;
77 const double LATITUD = -5.718794 ;
78 const double ELEVACIÓN = 745.0 ;
79 const double TEMPERATURA = 25.0 ;
80 const double PENDIENTE = 0.0 ;
81 const double ROTACIÓN AZM = 0.0 ;
82 const double REFRACT_ATMOS = 0.5667 ;
83 double PRESIÓN_PRECALIBADA;
84
85 // --- Intervalos y tiempos de espera ---
86 const unsigned long INA_READ_INTERVAL_MS = 30000 ;
87 const unsigned long SPA_CALCULATION_INTERVAL_MS = 15000 ; // Actualizado a los 15 segundos const unsigned long
88 THINGSPEAK_UPLOAD_INTERVAL_MS = 30000 ;
89 const unsigned long WIFI_SSID_ATTEMPT_TIMEOUT_MS = 10000 ;
90
91
92 // --- Umbrales Cero ---
93 const float CURRENT_ZERO_THRESHOLD_MA = 5.0 ; // Umbral para corriente constante float VOLTAGE_ZERO_THRESHOLD_V
94 = 0.1 ; // Umbral para voltaje
95
96
97 // --- Variable estática para rastrear la
98 próxima red a intentar prioritariamente --- static int nextSSIDtoTry = 1 ;
99
100 // --- Prototipos Funciones Esenciales ---
101 // Prototipos de funciones eliminadas: printDateTime, printFractionalHour, printSpaErrorDescription
102 void logDataToSD ( const DateTime & timestamp, float v1, float i1, float v2, float i2);
103 void setupSDCard ();
104 bool connectToWiFi ( int preferredNetworkToTry, int & connectSSIDNum);

```

```

105 bool uploadToThingSpeakWithLib ( float v1, float i1, float v2, float i2);
106 void setupMutexesAndQueues ();
107 void setupPeripherals ();
108 void setupWiFiManagement ();
109 void setupDisplay ();
110 void setupRs485 (); // Añadido void createApplicationTasks ();
111 void updateLcdFieldFloat ( float currentValue, float * displayedValue, int col, int row, int width , int prec);
112 void updateLcdFieldInt ( int valorActual, int * valorMostrado, int columna, int fila);
113 void printStaticLcdElements ();
114 void forceLcdDataRefresh ();
115 void positionSenderTask ( void * parámetro);
116
117
118 // ===== TAREA LECTURA INA219 y REGISTRO =====
119 void ina219_Task ( void * parámetro) {
120   DBG_PRINTLN(F( "Tarea INA219: Iniciada." ));
121   float v1_local, i1_local, v2_local, i2_local;
122   DateTime timestamp_local;
123   for (;;) {
124     bool readSuccess = false ;
125     if (xSemaphoreTake(i2cMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
126       v1_local = ina219_Panel1.getBusVoltage_V();
127       i1_local = ina219_Panel1.getCurrent_mA();
128       v2_local = ina219_Panel2.getBusVoltage_V();
129       i2_local = ina219_Panel2.getCurrent_mA();
130       timestamp_local = rtc.now();
131       xSemaphoreGive(i2cMutex);
132       readSuccess = true ;
133     } else {
134       DBG_PRINTLN(F( "Tarea INA219: ¡Error Mutex I2C!" ));
135     }
136
137     if (readSuccess) {
138       // Aplicar umbrales de cero para corriente if (fabsf(i1_local) < CURRENT_ZERO_THRESHOLD_MA) {
139       i1_local = 0.0 ;
140     } else if (i1_local < 0.0 ) {

```

```

141 i1_local = 0.0 ;
142 }
143 if (fabsf(i2_local) < CURRENT_ZERO_THRESHOLD_MA) {
144 i2_local = 0.0 ;
145 } else if (i2_local < 0.0 ) {
146 i2_local = 0.0 ;
147 }
148 // Aplicar umbrales de cero para voltaje if (fabsf(v1_local) < VOLTAGE_ZERO_THRESHOLD_V) {
149 v1_local = 0.0 ;
150 } else if (v1_local < 0.0 ) {
151 v1_local = 0.0 ;
152 }
153 si (fabsf(v2_local) < UMBRAL_CERO_DE_VOLTAJE_V) {
154 v2_local = 0.0 ;
155 } de lo contrario si (v2_local < 0.0 ) {
156 v2_local = 0.0 ;
157 }
158
159
160
161 si (xSemaphoreTake(xDataMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
162 g_V1 = v1_local;
163 g_I1 = i1_local;
164 g_V2 = v2_local;
165 g_I2 = i2_local;
166 xSemaphoreGive(xDataMutex);
167 } de lo contrario {
168 DBG_PRINTLN(F( "Tarea INA219: ¡Error xDataMutex!" ));
169 }
170 logDataToSD(marca de tiempo_local, v1_local, i1_local, v2_local, i2_local);
171 }
172 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(INA_READ_INTERVAL_MS));
173 }
174 }
175
176 // ===== TAREA DE CÁLCULO SPA, RTC y AZIMUT NORMALIZADO =====

```

```

177 void spa_Task ( void * parámetro) {
178   DBG_PRINTLN(F( "Tarea SPA: Iniciada." ));
179   PRESIÓN PRECALCULADA = 1013.25 * pow ( 1.0 - 2.25577e-5 * ELEVACIÓN, 5.25588 );
180   spa.zonahoraria = ZONAHORARIA;
181   spa.delta_utl = DELTA_UT1;
182   spa.delta_t = DELTA_T;
183   spa.longitud = LONGITUD;
184   spa.latitud = LATITUD;
185   spa.elevación = ELEVACIÓN;
186   spa.presión = PRESIÓN PRECALCULADA;
187   spa.temperatura = TEMPERATURA;
188   spa.slope = PENDIENTE;
189   spa.azm_rotation = ROTACIÓN_AZM;
190   spa.atmos_refract = REFRACTAMIENTO_ATMOS;
191   spa.función = SPA_ZA_RTS;
192   Fecha y hora spa_time_local;
193   doble amanecer_local, atardecer_local;
194   int esDía_local = 0 ;
195   doble azimuth_local normalizado = 0.0 ;
196
197   para (;;) {
198     bool rtcReadOkForSpa = falso ;
199     si (xSemaphoreTake(i2cMutex, pdMS_TO_TICKS( 100 )) == pdTRUE) {
200       tiempo_spa_local = rtc.now();
201       xSemaphoreGive(i2cMutex);
202       rtcReadOkForSpa = verdadero ;
203     } de lo contrario {
204       DBG_PRINTLN(F( "Error SPA_Task: Mutex I2C RTC." ));
205       vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(SPA_CALCULATION_INTERVAL_MS));
206       continuar ;
207     }
208
209     if (rtcReadOkForSpa) {
210       if (spa_time_local.year() < 2024 || spa_time_local.year() > 2099 ) { DBG_PRINTLN(F( "Advertencia SPA: Año RTC
211 inválido para cálculo." )); }
212

```

```

213     spa.año = spa_time_local.año();
214 spa.mes = spa_time_local.mes();
215 spa.día = spa_time_local.día();
216 spa.hora = spa_time_local.hora();
217 spa.minuto = spa_time_local.minuto();
218 spa.segundo = spa_time_local.segundo();
219
220     DBG_PRINTF( "Tarea SPA: Calculando para %04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d \n " ,
221         spa.año, spa.mes, spa.día, spa.hora, spa.minuto, spa.segundo);
222     int resultado = spa_calculate( & spa);
223
224     bool spaDataValid = (resultado == 0 );
225     esDía_local = 0 ;
226     amanecer_local = spaDataValid ? spa.amanecer : NAN;
227     sunset_local = spaDataValid ? spa.atardecer : NAN;
228
229     si ( ! isnan(amanecer_local) && ! isnan(atardecer_local) && amanecer_local > 0 && atardecer_local > 0 ) {
230     doble currentTimeFractional = spa.hora + (spa.minuto / 60.0 ) + (spa.segundo / 3600.0 );
231     si (currentTimeFractional >= amanecer_local && currentTimeFractional < atardecer_local) {
232     esDía_local = 1 ;
233     doble duraciónDía = atardecer_local - amanecer_local;
234     doble tiempoTranscurrido = currentTimeFractional - amanecer_local;
235     si (duraciónDía > 0.001 ) {
236     doble progresoDía = fmax( 0.0 , fmin( 1.0 , tiempoTranscurrido / duraciónDía));
237     azimut_local normalizado = acos( 1.0 - 2.0 * progresoDía) * ( 180.0 / M_PI);
238     } de lo contrario {
239     azimut_local normalizado = 90.0 ;
240     }
241     } de lo contrario {
242     es día_local = 0 ;
243     azimut_local normalizado = (tiempo_actual_fraccional < amanecer_local || tiempo_actual_fraccional >= 12.0 ) ?
244     180.0 : 0.0 ;
245     }
246     } de lo contrario {
247     es día_local = 0 ;
248     azimut_local normalizado = (hora_española < 12 ) ? 0.0 : 180.0 ;

```

```

249 }
250
251     si (xSemaphoreTake(xDataMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
252 g_D = spa_time_local.day();
253 g_H = spa_time_local.hour();
254 g_M = spa_time_local.minute();
255 g_S = spa_time_local.second();
256 si (spaDataValid) {
257 g_currentAzimut = spa.azimut;
258 g_currentElevation = spa.e;
259 } de lo contrario {
260 g_currentAzimut = NAN;
261 g_currentElevation = NAN;
262 }
263 g_normalizedAzimut = normalizedAzimut_local;
264 g_isDay = isDay_local;
265 xSemaphoreGive(xDataMutex);
266
267     if (xSpaCalculationCompleteSemaphore != NULL) {
268 DBG_PRINTLN(F( "Tarea SPA: Notificando cálculo completo." ));
269 xSemaphoreGive(xSpaCalculationCompleteSemaphore);
270 }
271 } else {
272 DBG_PRINTLN(F( "Tarea SPA: Error xDataMutex datos SPA!" ));
273 }
274 }
275 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(SPA_CALCULATION_INTERVAL_MS));
276 }
277 }
278
279 // ===== TAREA SUBIDA A THINGSPEAK =====
280 void thingspeak_Task ( void * parámetro) {
281 DBG_PRINTLN(F( "Tarea ThingSpeak: Iniciada." ));
282 float v1_local, i1_local, v2_local, i2_local;
283 for (;;) {
284 DBG_PRINTLN(F( "Tarea ThingSpeak: Nuevo ciclo de subida." ));

```

```

285 bool connectedThisCycle = false ;
286 int currentConnectedSSIDNum = 0 ;
287
288     if ( WiFi . status() != WL_CONNECTED) {
289     DBG_PRINT(F( "Tarea ThingSpeak: WiFi desconectado. Intentando conectar, priorizando SSID" ));
290     DBG_PRINTLN(nextSSIDtoTry);
291     connectThisCycle = connectToWiFi(nextSSIDtoTry, currentConnectedSSIDNum);
292     if (connectedThisCycle) {
293     DBG_PRINT(F( "Tarea ThingSpeak: Conectado a WiFi SSID" ));
294     DBG_PRINT(currentConnectedSSIDNum);
295     DBG_PRINT( " (" );
296     DBG_PRINT( WiFi . SSID ());
297     DBG_PRINTLN( ")." );
298     } else {
299     DBG_PRINTLN(F( "Tarea ThingSpeak: Falló la conexión a todas las redes WiFi. Omitiendo subir." ));
300     nextSSIDtoTry = (nextSSIDtoTry == 1 ) ? 2 : 1 ;
301     }
302     } else {
303     if ( String ( WiFi.SSID ()) == String ( SECRET_SSID1)) {
304     currentConnectedSSIDNum = 1 ;
305     } else if ( String ( WiFi.SSID ()) == String(SECRET_SSID2)) { currentConnectedSSIDNum = 2; } else {
306     currentConnectedSSIDNum = 0;
307     DBG_PRINTLN ( F (
308     " Tarea ThingSpeak : Conectado a SSID desconocido . Forzando la
309     desconexión ." ) ) ;
310     WiFi.disconnect ( true );
311     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 100 ));
312     }
313     if (currentConnectedSSIDNum != 0 ) {
314     DBG_PRINT(F( "Tarea ThingSpeak: Ya conectó a WiFi SSID" ) );
315     DBG_PRINT(currentConnectedSSIDNum);
316     DBG_PRINT( " (" );
317     DBG_PRINT( WiFi . SSID ());
318     DBG_PRINTLN( ")." );
319     conectadoEsteCiclo = verdadero ;
320     } de lo contrario {

```

```

321 conectadoEsteCiclo = falso ;
322 }
323 }
324
325     if (connectedThisCycle) {
326     if (xSemaphoreTake(xDataMutex, pdMS_TO_TICKS( 200 )) == pdTRUE) {
327     v1_local = g_V1;
328     i1_local = g_I1;
329     v2_local = g_V2;
330     i2_local = g_I2;
331     xSemaphoreGive(xDataMutex);
332     if ( ! isnan(v1_local) && ! isnan(i1_local) && ! isnan(v2_local) && ! isnan(i2_local)) {
333     DBG_PRINTLN(F( "Task ThingSpeak: Intentando subir datos..." ));
334     bool uploadSuccess = uploadToThingSpeakWithLib(v1_local, i1_local, v2_local, i2_local);
335     if (uploadSuccess) {
336     DBG_PRINTLN(F( "Task ThingSpeak: Datos subidos exitosamente." ));
337     nextSSIDtoTry = currentConnectedSSIDNum;
338     } else {
339     DBG_PRINT(F( "Task ThingSpeak: Falló la subida de datos en SSID" ));
340     DBG_PRINT(currentConnectedSSIDNum);
341     DBG_PRINTLN(F( "." ));
342     DBG_PRINTLN(F( "Task ThingSpeak: Forzando la desconexión y el cambio de red prioritaria." ));
343     WiFi . disconnect ( true );
344     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 1000 ));
345     nextSSIDtoTry = (currentConnectedSSIDNum == 1 ) ? 2 : 1 ;
346     }
347     } else {
348     DBG_PRINTLN(F( "Task ThingSpeak: Datos de sensores no válidos (NaN), subida omitida." ));
349     }
350     } else {
351     DBG_PRINTLN(F( "Tarea ThingSpeak: Tiempo de espera para tomar xDataMutex. Suba omitida." ));
352     }
353     }
354     DBG_PRINT(F( "Tarea ThingSpeak: Esperando " ));
355     DBG_PRINT(THINGSPEAK_UPLOAD_INTERVAL_MS / 1000 );
356     DBG_PRINTLN(F( " segundos..." ));

```

```

357 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(THINGSPEAK_UPLOAD_INTERVAL_MS));
358 }
359 }
360
361 // ===== TAREA ENVÍO DATOS POSICIÓN SOLAR (RS485) =====
362 void positionSenderTask ( void * parámetro) {
363     DBG_PRINTLN(F( "Task Position Sender: Iniciada. Esperando notificación de SPA..." ));
364     double local_norm_az, local_el;
365     int local_isDay;
366     char rs485Buffer[ 32 ]; // Buffer para formatear el mensaje RS485
367
368     para (;;) {
369         si (xSemaphoreTake(xSpaCalculationCompleteSemaphore, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
370             DBG_PRINTLN(F( "Posición de la tarea Remitente: Notificación recibida. Leyendo datos..." ));
371             si (xSemaphoreTake(xDataMutex, pdMS_TO_TICKS( 100 )) == pdTRUE) {
372                 norma_local_az = g_normalizedAzimuth;
373                 el_local = g_currentElevation;
374                 es_local = g_isDay;
375                 xSemaphoreGive(xDataMutex);
376
377                 if (isnan(local_el)) {
378                     DBG_PRINTLN(F( "Remitente de posición de tarea: Elevación es NAN. Usando 0." ));
379                     el_local = 0,0 ;
380                 }
381
382                 DBG_PRINTF( "Datos de posición -> NormAz: %.2f, Elev: %.2f, EsDeDia: %d \n " ,
383                             local_norm_az, local_el, local_isDay);
384
385                 // Formatear y enviar datos por RS485
386                 int len = snprintf(rs485Buffer, sizeof (rs485Buffer), "%.2f,%.2f,%d \n " ,
387                                 local_norm_az, local_el, local_isDay);
388
389                 if (len > 0 && len < sizeof (rs485Buffer)) { // Asegurarse de que snprintf fue exitoso digitalWrite
390                     (RS485_EN_PIN, HIGH ); // Habilitar transmisión RS485 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 5 )); // Pequeña pausa para
391                     asegurar que el conductor esté listo RS485. escribir ( ( uint8_t * )rs485Buffer, len);
392

```

```

393 RS485. rubor (); // Esperar a que se envíen todos los datos vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 5 )); // Pequeña pausa
394 antes de deshabilitar digitalWrite (RS485_EN_PIN, LOW ); // Deshabilitar transmisión (modo recepción)
395 DBG_PRINTLN(F( "Task Position Sender: Datos enviados por RS485." ));
396 } else {
397   DBG_PRINTLN(F( "Posición de tarea remitente: Error al formatear el buffer RS485." ));
398 }
399
400   } else {
401     DBG_PRINTLN(F( "Posición de tarea Remitente: Tiempo de espera al tomar xDataMutex." ));
402   }
403 }
404 }
405 }
406 // ===== FUNCION CONECTAR WIFI =====
407 bool connectToWiFi ( int preferredNetworkToTry, int & connectSSIDNum) {
408   connectSSIDNum = 0 ;
409   if ( WiFi . getMode() != WIFI_STA) {
410     WiFi . mode(WIFI_STA);
411     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 200 ));
412   }
413
414   const char * primarySSID = (preferredNetworkToTry == 1 ) ? SECRET_SSID1 : SECRET_SSID2;
415   const char * primaryPass = (preferredNetworkToTry == 1 ) ? SECRET_PASS1 : SECRET_PASS2;
416   const char * secondarySSID = (preferredNetworkToTry == 1 ) ? SECRET_SSID2 : SECRET_SSID1;
417   const char * secondaryPass = (preferredNetworkToTry == 1 ) ? SECRET_PASS2 : SECRET_PASS1;
418   int primaryNum = preferredNetworkToTry;
419   int secondaryNum = (preferredNetworkToTry == 1 ) ? 2 : 1 ;
420
421   DBG_PRINT(F( "connectToWiFi: Intentando prioritariamente SSID" ));
422   DBG_PRINT(primaryNum);
423   DBG_PRINT( " (" );
424   DBG_PRINT(primarySSID);
425   DBG_PRINTLN( ")" );
426   WiFi . disconnect ( true );
427   vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 100 ));
428   WiFi . begin (primarySSID, primaryPass);

```

```

429 unsigned long startAttemptTime = millis ();
430 while ( WiFi .status() != WL_CONNECTED && millis () - startAttemptTime < WIFI_SSID_ATTEMPT_TIMEOUT_MS) {
431   DBG_PRINT( "." );
432   vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 500 ));
433 }
434 DBG_PRINTLN();
435 if ( WiFi.status () == WL_CONNECTED) { DBG_PRINT
436   (F( "Conectado a WiFi! SSID: " ));
437   DBG_PRINT( WiFi.SSID ());
438   DBG_PRINT(F( ", IP: " ));
439   DBG_PRINTLN( WiFi.localIP ());
440   ; connectSSIDNum = primaryNum ;
441   return true ;
442 }
443
444   DBG_PRINTLN(F( "Falló la conexión SSID prioritaria. Desconectando e intentando secundaria..." ));
445   WiFi . disconnect ( true );
446   vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 500 ));
447   DBG_PRINT(F( "connectToWiFi: Intentando secundaria SSID" ));
448   DBG_PRINT(secondaryNum);
449   DBG_PRINT( " (" );
450   DBG_PRINT(secondarySSID);
451   DBG_PRINTLN( ")" );
452   WiFi . begin (secondarySSID, secondaryPass);
453   startAttemptTime = millis ();
454   while ( WiFi .status() != WL_CONNECTED && millis () - startAttemptTime < WIFI_SSID_ATTEMPT_TIMEOUT_MS) {
455     DBG_PRINT( "." );
456     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 500 ));
457   }
458   DBG_PRINTLN();
459   if ( WiFi . status() == WL_CONNECTED) {
460     DBG_PRINT(F( "Conectado a WiFi! SSID: " ));
461     DBG_PRINT( WiFi . SSID ());
462     DBG_PRINT(F( ", IP: " ));
463     DBG_PRINTLN( WiFi . IP local ());
464     connectSSIDNum = primaryNum;

```

```

465 return true ;
466 }
467
468 DBG_PRINTLN(F( "Falló la conexión a ambas redes WiFi." ));
469 Wifi . desconectar ( verdadero );
470 devolver falso ;
471 }
472
473 // ===== FUNCIÓN SUBIR A THINGSPEAK (CON LIBRERÍA) =====
474 bool uploadToThingSpeakWithLib ( float v1, float i1, float v2, float i2) {
475   if ( Wifi .status() != WL_CONNECTED) {
476     DBG_PRINTLN(F( "ThingSpeakLib Upload: WiFi no conectado al inicio de la función." ));
477     return false ;
478   }
479   ThingSpeak.setField( 1 , v1);
480   ThingSpeak.setField( 2 , i1);
481   ThingSpeak.setField( 3 , v2);
482   ThingSpeak.setField( 4 , i2);
483   DBG_PRINTLN(F( "ThingSpeakLib: Escribiendo campos..." ));
484   int httpCode = ThingSpeak.writeFields(SECRET_CH_ID, SECRET_WRITE_APIKEY);
485   if (httpCode == 200 ) {
486     DBG_PRINTLN(F( "ThingSpeakLib: Canal actualizado exitosamente." ));
487     return true ;
488   } else {
489     DBG_PRINT(F( "ThingSpeakLib Error: Falló la actualización del canal. Código: " ));
490     DBG_PRINTLN(httpCode);
491     return false ;
492   }
493 }
494
495 // ===== FUNCIONES DE REGISTRO Y FORMATO =====
496 void setupSDCard () {
497   DBG_PRINTLN(F( "Iniciando tarjeta SD..." ));
498   if ( ! SD . begin (SD_CS_PIN)) {
499     DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: Falló SD.begin()!" ));
500   return ;

```

```

501 }
502 File file = SD . open (DATA_FILENAME, FILE_READ);
503 if ( ! file) {
504   DBG_PRINT(DATA_FILENAME);
505   DBG_PRINTLN(F( " no encontrado. Creando..." ));
506   file = SD . open (DATA_FILENAME, FILE_WRITE);
507   if (file) {
508     file.println (F( "Timestamp,BusVoltage1_V,Current1_mA,BusVoltage2_V,Current2_mA" ));
509     file.close ();
510     DBG_PRINTLN (F( "Cabecera escrita." ));
511   } else {
512     DBG_PRINT(F( "Error crítico: No se pudo crear " ));
513     DBG_PRINTLN(DATA_FILENAME);
514   }
515 } else {
516   file.close ()
517 ; }
518 }
519
520 void logDataToSD ( const DateTime & timestamp, float v1, float i1, float v2, float i2) {
521   char bufferTs[ 25 ], bufferData[ 80 ];
522   snprintf(bufferTs, sizeof (bufferTs), "%04d-%02d-%02dT%02d:%02d:%02d" ,
523     timestamp.year(), timestamp.month(), timestamp.day(), timestamp.hour
524     (), timestamp.minute(), timestamp.second());
525   // Registrar la corriente en mA como se lee snprintf(bufferData, sizeof (bufferData), "%s,%.2f,%.1f,%.2f,%.1f"
526   ,
527     bufferTs, v1, i1, v2, i2);
528   if (xSemaphoreTake(sdMutex, pdMS_TO_TICKS( 500 )) == pdTRUE) {
529     Archivo dataFile = SD . open (DATA_FILENAME, FILE_APPEND);
530     if (dataFile) {
531       if ( ! dataFile.println (bufferData)) { DBG_PRINTLN(F( "Registro de errores SD: Falló escritura." )); }
532       dataFile.close ();
533     } else {
534       DBG_PRINT(F( "Registro de errores SD: No se pudo abrir " ));
535       DBG_PRINTLN(DATA_FILENAME);
536     }

```

```

537 xSemaphoreGive(sdMutex);
538 } else {
539   DBG_PRINTLN(F( "Registro de errores SD: Tiempo de espera Mutex SD." ));
540 }
541
542 }
543
544 // --- Funciones de Configuración Modulares ---
545 void setupMutexesAndQueues () {
546   DBG_PRINTLN(F( "Creando Mutexes y Semáforos..." ));
547   xDataMutex = xSemaphoreCreateMutex();
548   i2cMutex = xSemaphoreCreateMutex();
549   sdMutex = xSemaphoreCreateMutex();
550   xSpaCalculationCompleteSemaphore = xSemaphoreCreateBinary();
551   if ( ! xDataMutex || ! i2cMutex || ! sdMutex || ! xSpaCalculationCompleteSemaphore ) {
552     DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: Falló la creación de Mutex o Semáforo!" ));
553     mientras ( 1 )
554     ;
555   }
556 }
557
558 void setupPeripherals () {
559   DBG_PRINTLN(F( "Iniciando Periféricos..." ));
560   if (xSemaphoreTake(i2cMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
561     Wire.begin ();
562     xSemaphoreGive (i2cMutex);
563   } else {
564     DBG_PRINTLN(F( "Error Crítico: Mutex I2C Wire." ));
565     while ( 1 )
566     ;
567   }
568
569   bool rtcOk = false ;
570   if (xSemaphoreTake(i2cMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
571     if (rtc.begin ()) {
572       if ( ! rtc.isrunning() ) {

```

```

573 DBG_PRINTLN(F( "Adv: ¡RTC no corre!" ));
574 } else {
575 DBG_PRINT(F( "RTC OK. Hora actual: " ));
576 DateTime now = rtc.now();
577 DBG_PRINTF( "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d \n " , now.year(), now.month(), now.day(), now.hour(), now.minute(),
578 now.second());
579 rtcOk = true ;
580 }
581 } else {
582 DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: No RTC." ));
583 }
584 xSemaphoreGive(i2cMutex);
585 } else {
586 DBG_PRINTLN(F( "Error Crítico: Mutex I2C RTC." ));
587 }
588
589 bool ina1_ok = false , ina2_ok = false ;
590 if (xSemaphoreTake(i2cMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
591 ina1_ok = ina219_Panel1.begin ( );
592 ina2_ok = ina219_Panel2.begin ( );
593 xSemaphoreGive (i2cMutex);
594 DBG_PRINT(F( "INA P1: " ));
595 DBG_PRINTLN(ina1_ok ? "OK" : "FALLO" );
596 DBG_PRINT(F( "INA P2: " ));
597 DBG_PRINTLN(ina2_ok ? "OK" : "FALLO" );
598 } else {
599 DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: Mutex I2C INA." ));
600 }
601
602 si (xSemaphoreTake(sdMutex, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
603 setupSDCard();
604 xSemaphoreGive(sdMutex);
605 } de lo contrario {
606 DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: configuración de Mutex SD." ));
607 }
608 }

```

```

609
610 void setupWiFiManagement () { DBG_PRINTLN
611 (F( " Configurando WiFi..." ) );
612 WiFi.mode (WIFI_STA);
613 WiFi.disconnect ( true );
614 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 100 ));
615 ThingSpeak.begin (client);
616 }
617
618 void setupDisplay () {
619   DBG_PRINTLN(F( "Configurando pantalla LCD..." ));
620   lcd.setBacklightPin( 3 , POSITIVE);
621   lcd.setBacklight( HIGH );
622   lcd.begin ( 16 , 2 ) ;
623   lcd.clear ();
624   printStaticLcdElements ();
625   forceLcdDataRefresh();
626 }
627
628 void setupRs485 () {
629   DBG_PRINTLN(F( "Configurando RS485..." ));
630   pinMode (RS485_EN_PIN, SALIDA );
631   escritura digital (RS485_EN_PIN, BAJA ); // Iniciar en modo recepción por defecto RS485. comenzar ( 9600 ,
632 SERIAL_8N1, RS485_RX_PIN, RS485_TX_PIN);
633
634 }
635
636 void createApplicationTasks () {
637   DBG_PRINTLN(F( "Creando Tareas App..." ));
638   BaseType_t taskCheck;
639   taskCheck = xTaskCreatePinnedToCore(ina219_Task, "INA_Log" , 4096 , NULL , 2 , & inaTaskHandle,
640 tskNO_AFFINITY);
641   if (taskCheck != pdPASS) {
642     DBG_PRINTLN(F( "Error Crítico: Tarea INA." ));
643     while ( 1 )
644 ;

```

```

645 }
646 taskCheck = xTaskCreatePinnedToCore(spa_Task, "SPA_Calc" , 8192 , NULL , 3 , & spaTaskHandle, tskNO_AFFINITY);
647 if (taskCheck != pdPASS) {
648   DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: Tarea SPA." ));
649   while ( 1 )
650   ;
651 }
652
653 taskCheck = xTaskCreatePinnedToCore(thingspeak_Task, "ThingSpeak" , 8192 , NULL , 1 , y thingspeakTaskHandle,
654 tskNO_AFFINITY);
655 if (taskCheck != pdPASS) {
656   DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: Tarea ThingSpeak." ));
657   while ( 1 )
658   ;
659 }
660
661 taskCheck = xTaskCreatePinnedToCore(positionSenderTask, "PosSender" , 4096 , NULL , 2 , y
662 positionSenderTaskHandle, tskNO_AFFINITY);
663 if (taskCheck != pdPASS) {
664   DBG_PRINTLN(F( "Error crítico: Tarea Position Sender." ));
665   while ( 1 )
666   ;
667 }
668 }
669 // --- Funciones de actualización del LCD
670 --- void printStaticLcdElements ( ) { lcd.setCursor ( 4,0 )
671 ; lcd.print ( "
672 / " ) ; lcd.setCursor ( 9,0 ) ; lcd.print
673 (
674 " " ) ; lcd.setCursor
675 ( 12,0 ) ; lcd.print
676 ( " - " ) ;
677 lcd.setCursor ( 4,1 ) ; lcd.print ( "
678 / " ) ;
679 lcd.setCursor ( 9,1 ) ;
680 lcd.print ( " "

```

```

681 ) ; lcd.setCursor ( 12,1 )
682 ; lcd.print ( " : " ) ;
683 }
684
685 void forceLcdDataRefresh () {
686   mostrado_V1 = -99.9 ;
687   mostrado_V2 = -99.9 ;
688   mostrado_I1 = -99.9 ;
689   mostrado_I2 = -99.9 ;
690   mostrado_D = -1 ;
691   mostrado_H = -1 ;
692   mostrado_M = -1 ;
693   mostrado_S = -1 ;
694 }
695 void updateLcdFieldFloat ( float valorActual, float * valorMostrado, int columna, int fila, int ancho , int
696 prec) {
697   if ( abs (valorActual - * valorMostrado) > (prec == 1 ? 0.051 : 0.0051 ) || * valorMostrado < -99.0 ) {
698     dtostrf (valorActual, ancho , prec, tempFloatBuffer);
699     lcd.setCursor (columna, fila);
700     lcd.print (tempFloatBuffer);
701     * valorMostrado = valorActual ;
702   }
703 }
704 void updateLcdFieldInt ( int valorActual, int * valorMostrado, int columna, int fila) {
705   si (valorActual != * valorMostrado || * valorMostrado == -1 ) {
706     lcd.setCursor ( columna, fila);
707     si (valorActual < 10 && valorActual >= 0 ) { lcd.print ( '0' ) ; }
708     lcd.print (valorActual);
709     * valorMostrado = valorActual ;
710   }
711 }
712 //===== SETUP PRINCIPAL =====
713 void setup () {
714   // Inicializar Serial si DEBUG está habilitado #if DEBUG Serial . comenzar ( 115200 );
715   #endif DBG_PRINTLN(F( " \n Iniciando Sistema de Seguimiento Solar v3.0 (Depuración selectiva)..." ));
716   setupMutexesAndQueues();

```

```

717 setupPeriféricos();
718 configuraciónWiFiManagement();
719 configuraciónDisplay();
720 configuraciónRs485(); // Inicializar RS485 createApplicationTasks();
721 DBG_PRINTLN(F( "-----" ));
722 DBG_PRINTLN(F( "Configuración completada. Tareas en ejecución." ));
723 }
724
725 //===== LOOP PRINCIPAL (Actualización LCD) =====
726 void loop () {
727     unsigned long currentTime = millis ();
728     if (currentTime - lastLcdFullRefresh >= lcdFullRefreshInterval) {
729         lcd.clear ();
730         printStaticLcdElements();
731         forceLcdDataRefresh();
732         lastLcdFullRefresh = currentTime ;
733     }
734
735     flotante l_V1, l_V2, l_I1, l_I2;
736     int l_D, l_H, l_M, l_S;
737     Fecha y hora ahora para mostrar;
738     bool rtcReadOkForDisplay = false ;
739     if (xSemaphoreTake(i2cMutex, pdMS_TO_TICKS( 50 )) == pdTRUE) {
740         now_for_display = rtc.now();
741         xSemaphoreGive(i2cMutex);
742         rtcReadOkForDisplay = true ;
743     } else {
744         DBG_PRINTLN(F( "Loop LCD: Tiempo de espera al tomar i2cMutex para RTC." ));
745     }
746     si (xSemaphoreTake(xDataMutex, pdMS_TO_TICKS( 100 )) == pdTRUE) {
747         si (rtcReadOkForDisplay) {
748             g_D = ahora_para_mostrar.día();
749             g_H = ahora_para_mostrar.hora();
750             g_M = ahora_para_mostrar.minuto();
751             g_S = ahora_para_mostrar.segundo();
752         }

```

```

753 l_V1 = g_V1;
754 l_V2 = g_V2;
755 l_I1 = g_I1;
756 l_I2 = g_I2;
757 l_D = g_D;
758 l_H = g_H;
759 l_M = g_M;
760 l_S = g_S;
761 xSemaphoreGive(xDataMutex);
762     // Mostrar voltajes y tiempo
763     updateLcdFieldFloat(l_V1, & displayed_V1, 0 , 0 , 4 , 1 );
764 updateLcdFieldFloat(l_V2, & displayed_V2, 5 , 0 , 4 , 1 );
765 updateLcdFieldInt(l_D, & displayed_D, 10 , 0 );
766 updateLcdFieldInt(l_H, & displayed_H, 13 , 0 );
767 // Mostrar corrientes en amperios (dividido por 1000) updateLcdFieldFloat(l_I1 / 1000.0 , & displayed_I1, 0 , 1
768 , 4 , 2 );
769 updateLcdFieldFloat(l_I2 / 1000.0 , y mostrado_I2, 5 , 1 , 4 , 2 );
770 updateLcdFieldInt(l_M, y mostrado_M, 10 , 1 );
771 updateLcdFieldInt(l_S, y mostrado_S, 13 , 1 );
772 } else {
773 DBG_PRINTLN(F( "Loop LCD: Tiempo de espera al tomar xDataMutex." ));
774 }
775 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 200 ));
776
777 }
778

```

Código del receptor

```
1  #include <HardwareSerial.h>
2  #include <AccelStepper.h>
3  #include <cmath> // Para ceilf, fabsf, isnan, truncf
4  // --- Definiciones de Pines (Según tu última especificación) ---
5  // RS485
6  #define RS485_RX_PIN 17
7  #define RS485_TX_PIN 16
8  #define RS485_EN_PIN 3
9
10 // Motor Azimut
11 #define AZIMUT_ENABLE_PIN 23
12 #define AZIMUT_STEP_PIN 21
13 #define AZIMUT_DIR_PIN 19
14 #define AZ_INI_PIN 36 // Sensor final de carrera en posición 0° azimut
15 #define AZ_FIN_PIN 39 // Sensor final de carrera en posición 180° azimut
16
17 // Motor Elevación
18 #define ELEVA_ENABLE_PIN 25
19 #define ELEVA_STEP_PIN 27
20 #define ELEVA_DIR_PIN 14
21 #define EL_INI_PIN 34 // Sensor final de carrera en posición 0° elevación
22 #define EL_FIN_PIN 35 // Sensor final de carrera en posición 90° elevación
23
24 // --- Constantes de configuración (ACTUALIZADAS) ---
25 // Para movimientos de grados enteros
26 const int PASOS_POR_GRADO_AZIMUT_INT = 3587 / 180 ; // Truncado a 24 const int PASOS_POR_GRADO_ELEVACION_INT =
27 11118/90 ; // Truncado a 123 // Para cálculo preciso inicial const float PASOS_AZ_EXACTOS = 3587.0 / 180.0 ;
28 constante flotante PASOS_EL_EXACTOS = 11118.0 / 90.0 ;
29 flotador constante MAX_AZIMUT_GRADOS_ABS = 180.0 ;
30 flotador constante MAX_ELEVACION_GRADOS_ABS = 90.0 ;
31
32 flotador constante VELOCIDAD_MAX_AZIMUT = 200.0 ;
33 constante flotante ACELERACION_AZIMUT = 200.0 ;
```

```

34 constante flotador VELOCIDAD_MAX_ELEVACION = 200.0 ;
35 constante flotador ACELERACION_ELEVACION = 200.0 ;
36 const int VELOCIDAD_HOMING_AZ = 250 ;
37 const int VELOCIDAD_HOMING_EL = 250 ;
38
39 // --- Macro de depuración (habilitada) ---
40 #define DEBUG 1
41 #if DEBUG
42 #define DBG_PRINT(...) Serial.print(__VA_ARGS__)
43 #define DBG_PRINTLN(...) Serial.println(__VA_ARGS__)
44 #define DBG_PRINTF(...) Serial.printf(__VA_ARGS__)
45 #else
46 #define DBG_PRINT(...)
47 #define DBG_PRINTLN(...)
48 #define DBG_PRINTF(...)
49 #endif
50
51 // --- Variables Globales de Estado ---
52 HardwareSerial RS485 ( 1 );
53 char rs485Buffer[ 64 ];
54 uint8_t rs485BufPos = 0 ;
55
56 flotante volátil g_targetAzimutGrados = 0.0 ;
57 flotante volátil g_targetElevacionGrados = 0.0 ;
58 byte volátil g_esDeDia = 0 ;
59
60 AccelStepper azimutStepper (AccelStepper :: CONDUCTOR, AZIMUT_STEP_PIN, AZIMUT_DIR_PIN);
61 AccelStepper elevaStepper (AccelStepper :: CONTROLADOR, PIN_PASO_ELEVA, PIN_DIR_ELEVA);
62
63 volatile bool homingAzimutRealizado = false ;
64 volatile bool homingElevacionRealizado = false ;
65 volátil bool azimutMotorActivo = false ;
66 bool volátil elevaMotorActivo = false ;
67 byte ultimoEstadoLuz = 0 ;
68
69 // Nuevas variables para rastrear la última posición de referencia en grados

```

```

70 volatile float lastAchievedAzimutGrados = 0.0 ;
71 flotador volátil lastAchievedElevacionGrados = 0.0 ;
72 volátil bool inicialPositioningDone = false ; // Flag para el primer posicionamiento preciso
73 TaskHandle_t motorControlTaskHandle = NULL ;
74 SemaphoreHandle_t xReceivedDataMutex = NULL ;
75
76 // --- Prototipos de funciones ---
77 void motorControlLoop ( void * pvParameters);
78 bool realizarHomingAzimut ();
79 bool realizarHomingElevacion ();
80 void procesarComandoRS485 ( const char * comando);
81 void controlarHabilitacionMotores ( bool habilitarAzimutDeseado, bool habilitarElevacionDeseado);
82 long calcularPasosPrecisosObjetivo ( float gradosObjetivo, float pasosPorGradoExactos, float maxGrados); //
83 Renombrado para claridad
84
85 // ===== CONFIGURACIÓN =====
86 configuración vacía () {
87     Serial . comenzar ( 115200 );
88     DBG_PRINTLN(F( "Receptor Seguidor Solar ESP32 v1.4 - Seguimiento Incremental - Iniciando..." ));
89
90     pinMode (AZIMUT_ENABLE_PIN, SALIDA );
91     pinMode (ELEVA_ENABLE_PIN, SALIDA );
92     azimutMotorActivo = falso ;
93     elevaMotorActivo = falso ;
94
95     pinMode (AZ_INI_PIN, INPUT_PULLUP );
96     pinMode (AZ_FIN_PIN, INPUT_PULLUP );
97     pinMode (EL_INI_PIN, INPUT_PULLUP );
98     pinMode (EL_FIN_PIN, INPUT_PULLUP );
99
100     azimutStepper.setEnablePin(AZIMUT_ENABLE_PIN);
101     azimutStepper.setPinsInverted ( falso , falso , verdadero );
102     azimutStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_MAX_AZIMUT);
103     azimutStepper.setAcceleration(ACELERACIÓN_AZIMUT);
104
105     elevaStepper.setEnablePin(ELEVA_ENABLE_PIN);

```

```

106     elevaStepper.setPinsInverted ( falso , falso , verdadero );
107     elevaStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_MAX_ELEVACION);
108     elevaStepper.setAcceleration(ACELERACION_ELEVACION);
109
110     controlarHabilitacionMotores( falso , falso ); // Asegurar que estén deshabilitados
111
112     pinMode (RS485_EN_PIN, SALIDA );
113     digitalWrite (RS485_EN_PIN, BAJO );
114     RS485.begin ( 9600 , SERIAL_8N1, RS485_RX_PIN, RS485_TX_PIN) ;
115
116     xReceivedDataMutex = xSemaphoreCreateMutex();
117     if (xReceivedDataMutex == NULL ) {
118         DBG_PRINTLN(F( ";Error al crear xReceivedDataMutex!" ));
119         while ( 1 )
120         ;
121     }
122     xTaskCreatePinnedToCore(
123         motorControlLoop, "MotorControl" , 10000 , NULL , 1 , y motorControlTaskHandle, 0 );
124
125     DBG_PRINTLN(F( "Configuración completada. Tarea de control de motores iniciada." ));
126     últimoEstadoLuz = 2 ;
127 }
128 // ===== LOOP PRINCIPAL (Recepción RS485) =====
129 void loop () {
130     while (RS485.available ()) {
131         char c = RS485.read ();
132         if (c != '\n' && rs485BufPos < sizeof (rs485Buffer) - 1 ) {
133             rs485Buffer[rs485BufPos ++ ] = c;
134         } else {
135             rs485Buffer[rs485BufPos] = '\0' ;
136             procesarComandoRS485(rs485Buffer);
137             rs485BufPos = 0 ;
138         }
139     }
140     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 10 ));
141 }

```

```

142
143 // ===== PROCESAR COMANDO RS485 =====
144 void procesarComandoRS485 ( const char * comando) {
145     float az, el;
146     sin firmar int luz_int;
147     if (sscanf(comando, "%f,%f,%u" , & az, & el, & luz_int) == 3 ) {
148     if (xSemaphoreTake(xReceivedDataMutex, pdMS_TO_TICKS( 100 )) == pdTRUE) {
149         g_targetAzimutGrados = az;
150         g_targetElevacionGrados = el;
151         g_esDeDia = ( byte )luz_int;
152         xSemaphoreGive(xReceivedDataMutex);
153         DBG_PRINTF( "RS485 Recibido -> Az: %.2f, El: %.2f, Luz: %u \n " , g_targetAzimutGrados,
154 g_targetElevacionGrados, g_esDeDia);
155     } else {
156         DBG_PRINTLN(F( "Error mutex procesarComandoRS485" ));
157     }
158 } else {
159     DBG_PRINT(F( "Error de análisis RS485: " ));
160     DBG_PRINTLN(comando);
161 }
162 }
163 // ===== HABILITAR/DESHABILITAR MOTORES =====
164 void controlarHabilitacionMotores ( bool habilitarAzimutDeseado, bool habilitarElevacionDeseado) {
165     bool cambioEnAzimut = false ;
166     bool cambioEnElevacion = false ;
167
168     if (habilitarAzimutDeseado && ! azimutMotorActivo) {
169         azimutStepper.enableOutputs();
170         azimutMotorActivo = verdadero ;
171         cambioEnAzimut = true ;
172     } else if ( ! habilitarAzimutDeseado && azimutMotorActivo) {
173         azimutStepper.disableOutputs();
174         azimutMotorActivo = falso ;
175         cambioEnAzimut = true ;
176     }
177     if (habilitarElevacionDeseado && ! elevaMotorActivo) {

```

```

178 elevaStepper.enableOutputs();
179 elevaMotorActivo = verdadero ;
180 cambioEnElevacion = true ;
181 } else if ( ! habilitarElevacionDeseado && elevaMotorActivo) {
182 elevaStepper.disableOutputs();
183 elevaMotorActivo = false ;
184 cambioEnElevacion = true ;
185 }
186 if (cambioEnAzimut || cambioEnElevacion) {
187 DBG_PRINTF( "Estado Motores: Azimut %s, Elevación %s \n " ,
188 azimutMotorActivo ? "ON" : "OFF" , elevaMotorActivo ? "ON" : "OFF" );
189 }
190 }
191 // ===== REALIZAR HOMING AZIMUT =====
192 bool realizarHomingAzimut () {
193 DBG_PRINTLN(F( "Homing Azimut..." ));
194 controlarHabilitacionMotores( true , elevaMotorActivo);
195 azimutStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_HOMING_AZ);
196 azimutStepper.setAcceleration(ACELERACION_AZIMUT / 2 );
197 azimutPaso a paso. mover ( -1 * ( largo ) (MAX_AZIMUT_GRADOS_ABS * PASOS_AZ_EXACTOS * 1.2 ));
198 homingStartTime largo sin firmar = millis ();
199 mientras ( digitalRead (AZ_INI_PIN) == LOW ) {
200 si ( ! azimutStepper. run () ) {
201 DBG_PRINTLN(F( "Error Homing Az: Sensor INI no activado." ));
202 azimutStepper. stop ();
203 azimutStepper. setMaxSpeed(VELOCIDAD_MAX_AZIMUT);
204 azimutStepper. setAcceleration(ACELERACION_AZIMUT);
205 return false ;
206 }
207 si ( millis () - homingStartTime > 45000 ) {
208 DBG_PRINTLN(F( "Error Homing Az: ;Tiempo agotado!" ));
209 azimutStepper. stop ();
210 return false ;
211 }
212 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 1 ));
213 }

```

```

214 azimuthStepper. stop ();
215 azimuthStepper. setCurrentPosition( 0 );
216 DBG_PRINTLN(F( "Azimut de retorno correcto (0°)." ));
217 azimuthStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_MAX_AZIMUT);
218 azimuthStepper.setAcceleration(ACELERACION_AZIMUT);
219 return true ;
220 }
221 // ===== REALIZAR HOMING ELEVACION =====
222 bool realizarHomingElevacion () {
223   DBG_PRINTLN(F( "Homing Elevación..." ));
224   if ( digitalRead (EL_INI_PIN) == HIGH ) {
225     DBG_PRINTLN(F( "Elevación ya en 0°. Homing no necesario." ));
226     elevaStepper.setCurrentPosition( 0 );
227     devolver verdadero ;
228   }
229   controlarHabilitacionMotores(azimutMotorActivo, true );
230   elevaStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_HOMING_EL);
231   elevaStepper.setAcceleration(ACELERACION_ELEVACION / 2 );
232   elevapaso a paso. mover ( -1 * ( largo ) (MAX_ELEVACION_GRADOS_ABS * PASOS_EL_EXACTOS * 1.2 ));
233   homingStartTime largo sin firmar = millis ();
234   while ( digitalRead (EL_INI_PIN) == LOW ) {
235     if ( ! elevaStepper. run () ) {
236       DBG_PRINTLN(F( "Error Homing El: Sensor INI no activado." ));
237       elevapaso a paso. detener ();
238       elevaStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_MAX_ELEVACION);
239       elevaStepper.setAcceleration(ACELERACION_ELEVACION);
240       devolver falso ;
241     }
242     if ( millis () - homingStartTime > 30000 ) {
243       DBG_PRINTLN(F( "Error Homing El: ;Tiempo de espera!" ));
244       elevapaso a paso. detener ();
245       devolver falso ;
246     }
247     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 1 ));
248   }
249   elevaPaso a paso. detener ();

```

```

250 elevaStepper.setCurrentPosition( 0 );
251 DBG_PRINTLN(F( "Elevación de inicio OK (0°)." ));
252 elevaStepper.setMaxSpeed(VELOCIDAD_MAX_ELEVACION);
253 elevaStepper.setAcceleration(ACELERACION_ELEVACION);
254 devolver verdadero ;
255 }
256
257 // ===== CALCULAR PASOS PRECISOS OBJETIVO (Para posicionamiento inicial) =====
258 long calcularPasosPrecisosObjetivo ( float gradosObjetivo, float pasosPorGradoExactos, float maxGrados) {
259 if (isnan(gradosObjetivo)) {
260   DBG_PRINTLN(F( "CalcularPasosPrecisos: Grados NaN. Usando 0 ));
261   gradosObjetivo = 0.0 ;
262 }
263 gradosObjetivo = fmax( 0.0f , fmin(gradosObjetivo, maxGrados));
264 return ( long )roundf(gradosObjetivo * pasosPorGradoExactos);
265 }
266
267 // ===== TAREA DE CONTROL DE MOTORES (LÓGICA INCREMENTAL) =====
268 void motorControlLoop ( void * pvParameters) {
269   DBG_PRINTLN(F( "MotorControlLoop: Iniciada en Núcleo 0." ));
270   flotante localTargetAz = 0,0 , localTargetEl = 0,0 ;
271   byte localEsDeDia = 0 ;
272   bool necesitaHomingGeneral = true ; // Flag para indicar si se requiere homing (inicio o cambio a día)
273
274   para (;;) {
275     si (xSemaphoreTake(xReceivedDataMutex, pdMS_TO_TICKS( 50 )) == pdTRUE) {
276       localTargetAz = g_targetAzimutGrados;
277       localTargetEl = g_targetElevacionGrados;
278       localEsDeDia = g_esDeDia;
279       xSemaphoreGive(xReceivedDataMutex);
280     } de lo contrario {
281       vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 100 ));
282       continuar ;
283     }
284     // Lógica de Día/Noche y Homing
285     if (localEsDeDia == 0 ) { // Noche if (ultimoEstadoLuz == 1 ) {

```

```

286 DBG_PRINTLN(F( "MotorControl: Noche. Deshabilitando motores." ));
287 controlarHabilitacionMotores( false , false );
288 }
289 homingAzimutRealizado = false ;
290 homingElevacionRealizado = false ;
291 PosicionamientoInicialDone = false ; // Restablecer para el próximo día necesitaHomingGeneral = true ;
292 } else { // Día if (ultimoEstadoLuz == 0 || necesitaHomingGeneral) {
293   DBG_PRINTLN(F( "MotorControl: Día o necesita homing. Iniciando secuencia..." ));
294   controlarHabilitacionMotores( verdadero , verdadero );
295   homingAzimutRealizado = realizarHomingAzimut();
296   if (homingAzimutRealizado) {
297     homingElevacionRealizado = realizarHomingElevacion();
298   } else {
299     homingElevacionRealizado = false ;
300     DBG_PRINTLN(F( "MotorControl: Homing Azimut falló." ));
301   }
302
303   if (homingAzimutRealizado && homingElevacionRealizado) {
304     necesitaHomingGeneral = false ;
305     PosicionamientoInicialDone = false ; // Forzar posicionamiento preciso después del homing
306     DBG_PRINTLN(F( "MotorControl: Homing OK. Preparando para posicionamiento inicial." ));
307     controlarHabilitacionMotores( verdadero , falso ); // Azimut ON, Elevación OFF (se activará si necesita
308     moverse) } else {
309       DBG_PRINTLN(F( "MotorControl: Homing falló." ));
310       controlarHabilitacionMotores( false , false );
311     }
312   }
313 }
314 ultimoEstadoLuz = localEsDeDia;
315
316 // Lógica de Seguimiento
317 if (localEsDeDia == 1 && ! necesitaHomingGeneral && homingAzimutRealizado && homingElevacionRealizado) {
318   if ( ! azimutMotorActivo) { // Asegurar que azimut esté habilitado durante el día
319     controlarHabilitacionMotores( true , elevaMotorActivo);
320   }
321 }

```

```

322     if ( ! inicialPositioningDone) {
323         DBG_PRINTLN(F( "MotorControl: Realizando posicionamiento inicial preciso..." ));
324     long pasosObjAz = calcularPasosPrecisosObjetivo(localTargetAz, PASOS_AZ_EXACTOS, MAX_AZIMUT_GRADOS_ABS);
325     long pasosObjEl = calcularPasosPrecisosObjetivo(localTargetEl, PASOS_EL_EXACTOS, MAX_ELEVACION_GRADOS_ABS);
326
327     azimuthStepper.moveTo(pasosObjAz);
328     if (pasosObjEl != elevaStepper.currentPosition()) { // Solo mover elevación si es necesario
329     controlarHabilitacionMotores( true , true );
330     elevaStepper.moveTo(pasosObjEl);
331     }
332
333     // Esperar a que ambos motores lleguen a la posición inicial
334 // Esto es un bucle bloqueante simple, se podría mejorar con estados si es muy largo while
335 (azimuthStepper.distanceToGo() != 0 || elevaStepper.distanceToGo() != 0 ) {
336     azimuthStepper.correr ();
337     if (elevaMotorActivo) elevaStepper.correr (); // Correr elevación solo si está activo
338     vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 1 ));
339 }
340
341
342
343     lastAchievedAzimutGrados = localTargetAz; // Usar el target original para la referencia
344     lastAchievedElevacionGrados = localTargetEl;
345     PosicionamientoInicialDone = verdadero ;
346     DBG_PRINTF( "MotorControl: Posicionamiento inicial completado a Az: %.2f, El: %.2f \n " ,
347     lastAchievedAzimutGrados, lastAchievedElevacionGrados);
348     controlarHabilitacionMotores( verdadero , falso ); // Dejar Azimut ON, Elevación OFF hasta que necesite moverse
349
350     } else { // Seguimiento incremental por grados enteros // Azimut
351     float diffAz = localTargetAz - lastAchievedAzimutGrados;
352     if (fabsf(diffAz) >= 1.0f ) {
353     long enteroDegreesToMoveAz = truncf(diffAz);
354     if (wholeDegreesToMoveAz != 0 ) {
355     largo relativoStepsAz = WholeDegreesToMoveAz * PASOS_POR_GRADO_AZIMUT_INT;
356     DBG_PRINTF( "MotorControl Az: Moviendo %ld grados (rel. %ld pasos). Target: %.2f, LastAch: %.2f \n " ,
357     WholeDegreesToMoveAz, relativoStepsAz, localTargetAz, lastAchievedAzimutGrados);

```

```

358 azimuthPaso a paso. mover (relativoStepsAz);
359 últimoAzimutGradosLogrados += GradosToMoveAz enteros;
360 }
361 }
362 // Elevación
363 float diffEl = localTargetEl - lastAchievedElevacionGrados;
364 if (fabsf(diffEl) >= 1.0f ) {
365     long enteroDegreesToMoveEl = truncf(diffEl);
366     if (todoDegreesToMoveEl != 0 ) {
367         largo relativoStepsEl = enteroDegreesToMoveEl * PASOS_POR_GRADO_ELEVACION_INT;
368         DBG_PRINTF( "MotorControl El: Moviendo %ld grados (rel. %ld pasos). Target: %.2f, LastAch: %.2f \n " ,
369             WholeDegreesToMoveEl, relativoStepsEl, localTargetEl, lastAchievedElevacionGrados);
370         if ( ! elevaMotorActivo) controlarHabilitacionMotores( true , true ); // Habilitar si necesita moverse
371         elevaStepper. mover (relativoStepsEl);
372         lastAchievedElevacionGrados += wholeDegreesToMoveEl;
373     }
374 }
375 }
376 }
377
378 // Ejecutar los motores
379 if (azimutMotorActivo) azimuthStepper. correr ();
380 if (elevaMotorActivo) {
381     if (elevaStepper.distanceToGo() != 0 ) { // Solo correr si tiene a dónde ir elevaStepper. correr ();
382     } else {
383         // Si elevación llegó a su destino y azimuth también (o no se está moviendo azimuth) // se podría deshabilitar
384         elevación. Azimut se mantiene activado. if (azimutStepper.distanceToGo() == 0 && elevaMotorActivo) {
385             controlarHabilitacionMotores( true , false );
386         }
387     }
388 }
389 vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS( 1 ));
390 }
391 }

```

Anexo 6 Códigos complementarios

Código Para Motores

```
1  #include <AccelStepper.h> // Definición de pines para el motor de
2  azimuth
3  #define AZIMUT_ENABLE_PIN 23
4  #define AZIMUT_STEP_PIN 21
5  #define AZIMUT_DIR_PIN 19
6  #define AZ_INI 36 // Interruptor en posición 0°
7  #define AZ_FIN 39 // Interruptor en posición 180°
8
9  // Definición de pines para el motor de azimuth
10 #define ELEVA_ENABLE_PIN 25
11 #define ELEVA_STEP_PIN 27
12 #define ELEVA_DIR_PIN 14
13 #define EL_INI 35 // Interruptor en posición 0°
14 #define EL_FIN 34 // Interruptor en posición 180°
15
16 bool Azimut_actInicio = verdadero ;
17 bool Elevac_actInicio = verdadero ;
18
19 AccelStepper MotorAzimut (AccelStepper :: DRIVER, AZIMUT_STEP_PIN,
20 AZIMUT_DIR_PIN);
21 AccelStepper motorEleva (AccelStepper :: DRIVER, ELEVA_STEP_PIN,
22 ELEVA_DIR_PIN);
23
24 Void setup() {
25 Serie . comenzar ( 115200 );
26 motorEleva.setMaxSpeed( 1000 ); // Velocidad máxima permitida
27 motorEleva.setAcceleration( 500 ); // Aceleración
28 motorAzimut.setMaxSpeed( 1000 ); // Velocidad máxima permitida
29 motorAzimut.setAcceleration( 500 ); // Aceleración
30
31 pinMode (AZ_FIN, ENTRADA );
32 pinMode (AZ_INI, ENTRADA );
33 pinMode (AZIMUT_HABILITAR_PIN, SALIDA );
34 digitalWrite (AZIMUT_HABILITAR_PIN, BAJO );
35
36 pinMode (EL_FIN, ENTRADA );
37 pinMode (EL_INI, ENTRADA );
38 pinMode (ELEVA_HABILITAR_PIN, SALIDA );
39 digitalWrite (ELEVA_HABILITAR_PIN, BAJO );
40
41 PosiciónAzimut_Inicio();
42 PosicionElev_Inicio();
43 // calibrarMotorAzimut();
44 // calibrarMotorEleva();
45 }
46 Void loop () {
47 retraso ( 1000 ); // No se necesita ejecutar código en loop()
48 }
49 void PosicionAzimut_Inicio () {
50 motorAzimut. establecerVelocidad ( -250 );
51 mientras ( digitalRead (AZ_INI) == ALTO && Azimut_actInicio) {
52 motorAzimut.runSpeed();
```

```

53 }
54 Azimut_actInicio = falso ;
55 escritura digital (AZIMUT_ENABLE_PIN, ALTA );
56 motorAzimut. detener (); // Detener suavemente
57 Serial . println ( "Interruptor azimut INICIAL" );
58 }
59 void PosicionElev_Inicio () {
60 motorEleva. establecerVelocidad ( 300 ); // Velocidad constante de
61 búsqueda
62 while ( digitalRead (EL_INI) == HIGH && Elevac_actInicio) {
63 motorEleva.runSpeed();
64 }
65 Elevac_actInicio = falso ;
66 escritura digital (ELEVA_ENABLE_PIN, ALTA );
67 motorEleva. detener (); // Detener suavemente
68 Serial . println ( "Elevación del interruptor INICIAL" );
69 }
70 void calibrarMotorAzimut () {
71 motorAzimut. establecerVelocidad ( -250 );
72 mientras ( digitalRead (AZ_INI) == ALTO ) motorAzimut.runSpeed();
73 motorAzimut. detener (); // Detener suavemente
74 Serial . println ( "Interruptor azimut INICIAL" );
75 motorAzimut.setCurrentPosition( 0 );
76 retraso ( 5000 );
77 motorAzimut. establecerVelocidad ( 200 );
78 mientras ( digitalRead (AZ_FIN) == ALTO ) motorAzimut.runSpeed();
79 motorAzimut. detener (); // Detener suavemente
80 Serial . println ( "Interruptor azimut FINAL" );
81 float totalPasosAzimut = motorAzimut.currentPosition();
82 De serie . println (totalPasosAzimut);
83 retraso ( 500 );
84 escritura digital (AZIMUT_ENABLE_PIN, ALTA ); // Desactivar el motor
85 }
86 void calibrarMotorEleva () {
87 motorEleva. establecerVelocidad ( 300 ); // Velocidad constante de
88 búsqueda while ( digitalRead (EL_INI) == HIGH ) motorEleva.runSpeed();
89 motorEleva. detener (); // Detener suavemente
90 Serial . println ( "Interruptor elevacion inicial" );
91 motorEleva.setCurrentPosition( 0 ); // Definir la posición 0°
92 retardo ( 1000 );
93 motorEleva. establecerVelocidad ( -500 ); // Mover en la dirección
94 opuesta while ( digitalRead (EL_FIN) == HIGH ) motorEleva.runSpeed();
95 motorEleva. detener (); // Detener suavemente
96 Serial . println ( "Elevación final del interruptor" );
97 int totalPasosEleva = motorEleva.currentPosition();
98 De serie . println (totalPasosEleva);
99 retraso ( 500 );
100 escritura digital (ELEVA_ENABLE_PIN, ALTA ); // Desactivar el motor
101 }

```

Código Para Sensor de Voltaje y Corriente INA219

```

1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_INA219.h>

```

```

3 // Crear instancias para cada INA219 con direcciones personalizadas
4 Adafruit_INA219 ina219_1 ( 0x41 );
5 Adafruit_INA219 ina219_2 ( 0x44 );
6
7 void setup ( ) {
8   Serial.begin ( 115200 )
9   ; Cable.begin ( ) ;
10
11   // Inicializar el primer INA219
12   if ( ! ina219_1.begin ( ) ) {
13     Serial . println ( "Error al encontrar INA219 en 0x41" );
14     mientras ( 1 )
15     ;
16   }
17   // Inicializar el segundo INA219
18   if ( ! ina219_2.begin ( ) ) {
19     Serial . println ( "Error al encontrar INA219 en 0x44" );
20     mientras ( 1 )
21     ;
22   }
23 }
24 void loop ( ) {
25   // Leer los valores del primer panel solar
26   float busVoltage1 = ina219_1.getBusVoltage_V();
27   float current_mA1 = ina219_1.getCurrent_mA();
28   float power_mW1 = ina219_1.getPower_mW();
29
30   // Leer los valores del segundo panel solar
31   float busVoltage2 = ina219_2.getBusVoltage_V();
32   float current_mA2 = ina219_2.getCurrent_mA();
33   float power_mW2 = ina219_2.getPower_mW();
34
35   // Mostrar datos en el monitor serie
36   Serial . println ( "Panel 1:" );
37   De serie . imprimir ( "Voltaje: " );
38   De serie . imprimir ( voltaje del bus1);
39   De serie . imprimirln ( "V" );
40   De serie . imprimir ( "Corriente: " );
41   De serie . imprimir ( actual_mA1);
42   De serie . println ( "mA" );
43
44   Serial . println ( "Panel 2:" );
45   Serial . print ( "Voltaje: " );
46   Serial . print ( VoltajeBus2);
47   Serial . println ( " V" );
48   Serial . print ( "Corriente: " );
49   Serial . print ( corriente_mA2);
50   Serial . println ( " mA" );
51
52   Serie . println ( "-----" );
53
54   retraso ( 1000 ); // Esperar 1 segundo antes de la siguiente lectura
55 }

```

Código para conectarse a wifi y enviar datos al TingSpeak

```
1
2 #include <WiFi.h>
3 #include "secretos.h"
4 #include "ThingSpeak.h"
5
6 // Credenciales para dos enrutadores
7 char ssid1[] = SECRET_SSID1; // Primer enrutador
8 char pass1[] = SECRET_PASS1; // fresadora de imprimación Contraseña
9 char ssid2[] = SECRET_SSID2; // Segundo enrutador
10 char pass2[] = SECRET_PASS2; // Contraseña segundo enrutador
11
12 WiFiClient Cliente ;
13 valor largo sin signo myChannelNumber = SECRET_CH_ID;
14 const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;
15
16 // Función para intentar conectar un enrutador dado
17 bool attemptWiFiConnection ( const char * ssid, const char * pass,
18 unsigned long timeoutMillis) {
19     unsigned long startAttemptTime = millis ();
20     WiFi.begin (ssid, pass);
21     Serial.print ( " Conectando a " ) ;
22     Serial.print ( ssid );
23     Serial.print ( " . " ) ;
24
25     mientras ( WiFi . status() != WL_CONNECTED && ( millis () -
26 startAttemptTime < timeoutMillis)) {
27         retraso ( 500 );
28         Serie . print ( "." );
29     }
30     if ( WiFi . status() == WL_CONNECTED) {
31         Serial . println ( " \n Conectado a " + String (ssid));
32         return true ;
33     } else {
34         Serial . println ( " \n Error: No se pudo conectar a " + String
35 (ssid));
36         return false ;
37     }
38 }
39 // Función que intenta conectarse a ambos enrutadores de forma
40 secuencial
41 bool connectToWiFi ( unsigned long timeoutMillis) {
42     // Intentar conexión al primer enrutador if
43     (attemptWiFiConnection(ssid1, pass1, timeoutMillis)) {
44         return true ;
45     }
46     // Si falla, desconecta y trata con el segundo enrutador
47     WiFi . desconectar ();
48     De serie . println ( "Intentando conexión con el segundo
49 enrutador..." );
50     if (intentoWiFiConnection(ssid2, pass2, timeoutMillis)) {
51         return true ;
52     }
53     devuelve falso ;
54 }
```

```

55 // Tarea FreeRTOS para enviar datos periódicamente a ThingSpeak sin
56 bloquear el bucle principal
57 void sendDataTask ( void * pvParameters) {
58     while ( true ) {
59         // Verificar el estado de la conexión
60         if ( WiFi .status() != WL_CONNECTED) {
61             Serial . println ( "WiFi desconectado. Intentando reconectar..." );
62             Wifi . desconectar ();
63             if ( ! connectToWiFi( 5000 )) {
64                 Serie . println ( "No se pudo conectar a ninguna red. Se omite el
65 envío de datos." );
66                 vTaskDelay( 3000 / puertoTICK_PERIOD_MS);
67                 continuar ; // Pasa a la siguiente iteración del ciclo }
68             }
69             // Simulación de datos (reemplazar por lecturas reales)
70             ThingSpeak.setField( 1 , random ( 0 , 100 ));
71             ThingSpeak.setField( 2 , aleatorio ( 0 , 100 ));
72             ThingSpeak.setField( 3 , aleatorio ( 0 , 100 ));
73             ThingSpeak.setField( 4 , aleatorio ( 0 , 100 ));
74
75             respuesta int = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber,
76 myWriteAPIKey);
77             if (respuesta == 200 ) {
78                 Serie . println ( "Datos enviados correctamente a ThingSpeak." );
79             } más {
80                 Serie . println ( "Error al enviar datos. Código HTTP: " + String
81 (respuesta));
82             }
83             vTaskDelay( 20000 / puertoTICK_PERIOD_MS); // Espera 30 segundos
84 sin bloquear }
85 }
86 void setup ( ) {
87     Serial.begin ( 115200 ) ;
88
89     if ( ! connectToWiFi( 10000 )) {
90         Serie . println ( "No se logró conectar a ninguna red en el setup. Se
91 continuará sin conexión." );
92     }
93     ThingSpeak.begin (cliente) ;
94
95     // Crear tarea para enviar datos sin bloquear el bucle principal
96     xTaskCreatePinnedToCore(sendDataTask, "SendDataTask" , 4096 , NULL
97 , 1 , NULL , tskNO_AFFINITY);
98 }
99 void loop () {
100 // Loop vacío para liberar el procesamiento al resto de tareas
101 }

```

Código para guardar datos en memoria SD

```

1 #include "FS.h"
2 #include "SD.h"
3 #include "SPI.h"
4 #include <Wire.h>

```

```

5 #include <RTClib.h>
6
7 RTC_DS1307 rtc;
8
9 // Sensores fijos simulados
10 const float SV1 = 42.58 ;
11 flotador constante SI1 = 15,07 ;
12 flotación constante SV2 = 31,81 ;
13 flotador constante SI2 = 21,87 ;
14
15 búfer de caracteres [ 100 ]; // Buffer para la cadena de datos
16
17 void setup ( ) {
18   Serial.begin ( 115200 )
19   ; Cable.begin ( ) ;
20
21   if ( ! rtc.comenzar () ) {
22     Serie.println ( "No se pudo encontrar el RTC" );
23     mientras ( 1 );
24   }
25   Serial.print ( "Tarjeta SD: " );
26   if ( ! SD.begin ( 5 ) ) {
27     Serial.println ( "Incorrecto" );
28     while ( 1 );
29   }
30   Serial.println ( "Correcto" );
31 }
32
33 bucle vacío ( ) {
34   DateTime HoraFecha = rtc.now(); // Obtener la fecha y hora actual
35
36   // Formatear la fecha y los datos en un solo buffer
37   snprintf( buffer , sizeof ( buffer ) , "%04d/%02d/%02d
38 %02d:%02d:%02d,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f \r\n " , HoraFecha.year(),
39 HoraFecha.month(), HoraFecha.day(), HoraFecha.hour(),
40 HoraFecha.minuto(), HoraFecha.segundo(), SV1, SI1, SV2, SI2);
41 appendFile( SD , "/Data.txt" , búfer );
42 retraso ( 5000 );
43 }
44 void
45 appendFile (fs :: FS & fs, const char * path, const char *message) {
46   Serial.printf( "Agregando al archivo: %s \n " , path);
47
48   Archivo archivo = fs.abrir (ruta, FILE_APPEND);
49   if ( ! archivo) {
50     Serie.println ( "Error: No se pudo abrir el archivo." );
51     devolver ;
52   }
53   if (archivo.print (mensaje)) {
54     Serial.println ( "Datos guardados." );
55   } más {
56     Serie.println ( "Error: No se guardaron los datos." );
57   }
58   archivo.cerca ();
59 }

```

Código para final de carrera

```
1 // Definición del pin del interruptor final de carrera
2 const int interruptorPin = 27 ;
3
4 // Variable para almacenar el estado del interruptor
5 int estadoInterruptor = 0 ;
6
7 void setup () {
8 // Inicializar comunicación serial a 115200 baudios
9 Serial . comenzar ( 115200 );
10 // Configurar el pin del interruptor como entrada con pull-up interno
11 pinMode (interruptorPin, INPUT_PULLUP );
12
13 // Breve mensaje inicial
14 Serial . println ( "Iniciando monitoreo del interruptor final de
15 carrera..." );
16 De serie . println ( "Estado: 0 = Presionado (BAJO), 1 = No presionado
17 (ALTO)" );
18 }
19
20 void loop () {
21 // Leer el estado del interruptor
22 estadoInterruptor = digitalRead (interruptorPin);
23
24 // Mostrar el estado en el Monitor Serial
25 // Serial.print("Estado del interruptor: "); //
26 Serial.println(estadoInterruptor);
27
28 // Verificar si el interruptor está funcionando
29 if (estadoInterruptor == LOW ) {
30 Serial . imprimirln ( "1" );
31 } más {
32 Serie . println ( "" );
33 }
34 // Pequeña espera para no saturar el monitor
35 delay ( 100 );
36 }
```

Anexo 7 Base de datos recolectados

Tabla 8

Promedio por hora de los 25 días de recolección de datos.

FECHA	Prom V(V).	Prom I(mA).	Prom V(V).	Prom I(mA).	Prom P(W).	Prom P(W).
HORA	Pss	Pss	Psf	Psf	Pss	Psf
May 2025	14.51	436.27	12.10	387.95	7.5647	6.2180
17-May	15.22	452.85	13.09	408.92	8.1425	6.8085
06	1.02	49.43	0.29	34.91	0.0651	0.0125
07	4.92	180.10	1.44	132.62	0.9204	0.2002
08	8.80	317.56	2.34	205.06	2.9172	0.5129
09	18.11	558.85	14.64	467.28	10.2906	7.3068
10	19.61	568.92	18.45	532.73	11.1589	9.8313
11	19.46	560.37	18.98	544.33	10.9070	10.3308
12	19.25	556.90	18.82	543.05	10.7232	10.2245
13	19.42	557.62	19.01	545.32	10.8295	10.3676
14	19.40	558.38	18.68	537.20	10.8333	10.0378
15	19.03	553.42	17.84	519.48	10.6745	9.4348
16	19.64	563.41	17.67	520.56	11.0677	9.2054
17	8.28	246.96	3.79	175.32	4.0628	1.5081
18	0.37	29.49	0.00	9.90	0.0111	0.0000

18-May	16.81	497.46	14.16	430.82	9.0368	7.4694
06	6.02	264.38	0.26	74.24	2.0773	0.0218
07	9.35	308.43	0.45	104.27	3.0912	0.0567
08	15.74	528.23	10.59	390.48	8.4103	4.7837
09	19.44	556.35	18.50	529.22	10.8230	9.8117
10	19.79	563.50	19.02	541.59	11.1543	10.3075
11	19.74	562.30	19.23	547.72	11.1015	10.5326
12	19.47	557.18	19.09	546.45	10.8503	10.4311
13	19.44	556.73	18.99	544.79	10.8227	10.3472
14	19.51	558.14	18.88	540.90	10.8897	10.2140
15	19.63	561.45	18.56	532.97	11.0234	9.8916
16	19.55	564.29	17.40	515.09	11.0310	8.9722
17	10.45	320.08	3.76	173.24	4.6877	1.4855
18	0.53	54.67	0.00	10.10	0.0313	0.0000
19-May	13.31	416.28	10.72	356.10	6.8482	5.4492
06	0.53	35.29	0.00	7.86	0.0248	0.0000
07	2.48	98.03	0.03	24.41	0.2565	0.0010
08	7.34	271.92	1.50	147.91	2.3068	0.3801
09	12.62	451.13	6.93	330.26	5.8904	2.5776
10	18.11	563.97	15.65	493.12	10.3091	7.8628
11	14.18	467.49	12.31	428.26	7.1390	5.9301

12	15.44	491.99	13.99	461.16	7.8727	6.8928
13	19.87	569.92	18.97	544.99	11.3265	10.3421
14	19.82	567.13	19.05	546.26	11.2448	10.4110
15	19.80	564.77	19.03	545.97	11.1904	10.3951
16	18.88	549.64	15.98	497.18	10.4685	8.1689
17	5.20	199.52	0.62	98.81	1.2569	0.1164
18	1.62	81.69	0.00	9.58	0.1395	0.0000
20-May	11.92	368.50	9.43	336.10	5.7326	4.6249
06	0.32	20.77	0.00	5.47	0.0082	0.0000
07	1.65	63.13	0.11	41.62	0.1243	0.0079
08	7.27	260.44	3.46	229.04	2.2452	1.1502
09	11.43	357.92	6.32	318.30	4.2036	2.2038
10	11.37	356.04	5.94	312.67	4.1152	1.9551
11	17.24	525.52	15.57	491.30	9.1615	7.8167
12	19.58	558.48	19.07	546.34	10.9438	10.4312
13	19.13	554.41	18.44	537.09	10.6245	9.9284
14	19.06	554.98	18.35	535.51	10.6181	9.8560
15	17.70	531.22	15.58	487.00	9.6823	8.0403
16	10.38	375.63	6.17	310.88	4.1676	2.2505
17	3.43	128.46	0.50	90.43	0.6924	0.0832
18	0.13	20.46	0.00	0.34	0.0028	0.0000

21-May	14.83	446.80	12.50	402.38	7.7508	6.4559
06	1.55	60.78	0.10	36.99	0.1148	0.0048
07	8.44	291.64	1.66	164.28	3.2917	0.4460
08	17.97	538.34	15.32	486.45	9.7751	7.6694
09	18.74	562.56	16.94	514.37	10.5597	8.7330
10	19.42	555.31	18.91	543.77	10.7879	10.2927
11	19.71	560.32	19.22	548.35	11.0513	10.5424
12	19.51	554.70	19.19	547.91	10.8246	10.5158
13	18.91	549.68	18.39	536.08	10.3993	9.8645
14	17.94	531.82	16.65	509.23	9.5728	8.5400
15	16.07	490.64	12.22	433.73	8.0968	5.5508
16	10.24	371.11	4.81	258.10	4.3331	1.9731
17	4.00	150.20	0.65	95.24	0.8535	0.1636
18	0.74	27.59	0.00	9.79	0.0204	0.0000
22-May	14.78	444.09	12.22	392.18	7.8057	6.3368
06	1.01	84.73	0.10	41.25	0.1431	0.0078
07	9.81	332.84	2.71	216.77	3.8350	0.8326
08	13.79	444.94	9.01	369.73	6.5035	3.7831
09	18.21	537.21	16.83	511.28	9.8148	8.7050
10	19.27	555.60	18.61	538.81	10.7194	10.0427
11	19.78	560.89	19.18	534.50	11.1008	10.2395

12	19.70	560.26	19.11	546.15	11.0390	10.4367
13	19.74	562.01	19.06	545.43	11.0953	10.3995
14	19.85	564.08	19.10	545.97	11.2010	10.4272
15	19.48	562.79	17.73	524.44	10.9953	9.4187
16	14.77	468.70	7.85	328.03	7.5305	3.4281
17	2.56	109.72	0.16	50.68	0.3409	0.0109
18	0.17	32.59	0.00	9.91	0.0056	0.0000
23-May	14.41	430.92	11.75	384.95	7.3721	5.9699
06	5.43	194.72	0.14	49.53	1.9714	0.0109
07	8.51	285.59	2.80	206.75	3.2078	0.9058
08	17.23	528.82	14.46	464.30	9.2913	7.0789
09	19.32	552.60	17.64	514.89	10.7671	9.2694
10	19.47	557.72	18.43	531.69	10.8821	9.8420
11	18.93	546.89	18.22	529.17	10.4734	9.8061
12	19.44	555.41	19.01	544.78	10.8042	10.3634
13	19.61	559.96	18.81	539.04	10.9917	10.1494
14	17.58	517.01	15.27	479.70	9.1620	7.4847
15	13.30	412.11	8.84	359.76	5.8958	3.7613
16	10.11	336.05	4.53	264.78	3.7420	1.5695
17	2.56	92.80	0.22	63.23	0.2915	0.0213
18	0.82	22.30	0.00	7.06	0.0207	0.0000

24-May	14.80	440.70	12.42	394.67	7.8927	6.5304
06	0.34	53.19	0.06	27.89	0.0233	0.0026
07	3.22	160.76	0.71	126.35	0.5869	0.1172
08	7.94	272.38	2.88	234.35	2.2432	0.7309
09	18.91	550.21	16.21	500.53	10.4857	8.2166
10	20.12	572.56	19.01	543.67	11.5262	10.3386
11	19.74	565.50	18.90	542.01	11.1734	10.2531
12	19.73	564.67	18.87	541.57	11.1515	10.2269
13	19.50	560.23	18.77	540.05	10.9341	10.1460
14	19.83	569.61	18.53	536.46	11.3059	9.9587
15	20.24	575.30	18.95	542.53	11.6443	10.2805
16	19.70	560.31	14.83	467.27	11.1063	7.6938
17	6.73	235.39	0.69	103.36	1.9570	0.1281
18	0.64	75.40	0.00	8.93	0.0516	0.0000
25-May	14.31	433.86	12.01	387.84	7.4956	6.1930
06	0.32	45.52	0.01	18.36	0.0169	0.0004
07	6.43	247.06	1.43	157.28	2.0553	0.3284
08	12.65	409.38	8.42	353.34	5.7428	3.5273
09	16.73	496.15	14.13	456.05	8.7814	7.1894
10	19.95	569.23	18.99	542.83	11.3552	10.3103
11	18.82	549.09	17.89	524.42	10.4946	9.5600

12	19.46	555.87	18.96	542.38	10.8227	10.2889
13	19.76	562.83	19.04	543.46	11.1228	10.3529
14	19.01	549.76	17.77	521.71	10.5908	9.4823
15	18.78	542.41	16.91	506.63	10.4030	8.9292
16	13.16	436.78	7.09	327.92	6.0369	2.6592
17	2.91	136.95	0.21	60.51	0.5000	0.0193
18	0.15	42.56	0.00	9.41	0.0064	0.0000
26-May	14.07	432.67	11.68	376.90	7.4540	5.9673
06	0.25	50.81	0.04	22.09	0.0180	0.0017
07	3.55	172.50	0.41	99.41	0.6705	0.0487
08	12.96	403.04	7.96	325.19	5.9282	3.7180
09	18.40	557.54	16.10	497.94	10.3082	8.1151
10	20.12	571.35	19.12	544.06	11.4960	10.4049
11	19.84	565.58	18.98	542.01	11.2209	10.2880
12	16.00	507.83	15.03	480.30	8.2653	7.3672
13	19.03	553.86	18.00	527.76	10.5443	9.5017
14	18.90	557.56	17.65	522.44	10.5491	9.2329
15	18.56	551.07	16.05	495.09	10.3074	8.1815
16	15.57	499.87	8.85	357.90	8.1273	3.8249
17	3.51	143.12	0.19	55.99	0.8681	0.0153
18	0.25	42.58	0.00	10.19	0.0114	0.0000

27-May	13.77	421.54	11.53	371.93	7.0774	5.8551
06	0.62	59.46	0.07	28.54	0.0457	0.0035
07	3.53	158.29	0.31	82.10	0.6252	0.0302
08	10.81	381.07	5.32	287.37	4.2386	1.7301
09	17.51	529.20	14.82	465.47	9.4647	7.2358
10	18.93	546.67	18.15	525.71	10.3944	9.6077
11	18.61	541.79	18.06	526.32	10.1337	9.5750
12	19.21	546.01	19.06	542.69	10.4952	10.3531
13	19.62	555.94	19.09	542.43	10.9080	10.3579
14	19.45	555.30	18.41	528.55	10.8087	9.7457
15	18.70	544.38	16.87	499.09	10.2635	8.6406
16	11.36	413.90	5.29	290.96	4.8275	1.6091
17	3.97	149.28	0.31	70.23	1.1196	0.0398
18	0.29	33.49	0.00	7.45	0.0103	0.0000
28-May	13.69	417.15	11.29	379.26	6.8395	5.6739
06	0.68	80.82	0.12	40.48	0.0715	0.0075
07	5.18	203.84	1.42	172.91	1.1577	0.2931
08	11.10	336.48	6.47	319.66	3.8351	2.1689
09	19.13	555.85	17.37	511.85	10.6493	8.9139
10	19.88	565.00	18.91	538.43	11.2369	10.1816
11	19.60	558.67	18.90	539.70	10.9529	10.2013

12	19.54	556.17	19.00	541.13	10.8704	10.2827
13	19.43	556.40	18.67	536.34	10.8168	10.0183
14	12.79	389.87	9.00	357.75	5.5467	4.0914
15	12.37	426.77	8.97	368.35	5.5623	3.6755
16	16.59	498.04	13.57	443.13	8.6014	6.8610
17	5.11	208.22	0.58	109.28	1.2325	0.0881
18	0.43	33.40	0.00	7.98	0.0187	0.0000
30-May	14.93	435.41	12.50	390.26	7.7366	6.4232
06	0.90	63.23	0.07	29.34	0.0770	0.0033
07	6.83	238.95	1.17	155.92	1.7601	0.2274
08	15.52	489.38	9.69	373.04	7.8480	4.0415
09	19.79	552.63	18.80	529.23	10.9372	9.9661
10	19.40	547.66	18.53	527.64	10.6603	9.8541
11	18.71	529.57	18.04	519.06	10.0532	9.6333
12	19.12	539.44	18.71	532.22	10.3940	10.0595
13	19.79	555.11	19.06	537.63	10.9881	10.2511
14	17.51	506.06	15.87	478.38	9.2411	8.1613
15	18.59	524.95	16.50	484.07	10.1020	8.5538
16	13.86	411.86	9.32	332.57	6.7535	4.3910
17	6.11	187.24	1.50	106.91	2.3313	0.5096
18	0.32	35.14	0.00	6.97	0.0117	0.0000

31-May	16.31	470.48	14.07	419.79	8.7459	7.3108
06	0.93	77.01	0.04	21.97	0.0916	0.0017
07	7.35	259.78	1.21	147.88	2.1905	0.2581
08	19.09	564.05	15.88	482.93	10.7741	7.7307
09	19.43	546.57	18.52	524.22	10.6279	9.7212
10	19.56	552.95	18.55	526.92	10.8179	9.7845
11	19.31	546.61	18.53	527.52	10.6211	9.8649
12	19.65	552.71	19.11	540.86	10.9074	10.3921
13	19.13	545.25	18.41	527.36	10.5193	9.8167
14	19.78	554.06	18.93	532.99	10.9623	10.0898
15	19.15	541.93	17.93	511.30	10.5781	9.3757
16	19.84	554.49	17.42	505.32	11.0006	8.8251
17	9.92	290.06	1.93	123.00	4.3749	0.6118
18	0.70	47.15	0.00	8.91	0.0369	0.0000
Jun 2025	15.05	434.30	12.42	385.64	7.7510	6.3612
1-Jun	14.95	437.94	12.28	386.11	7.6646	6.2599
06	1.08	100.04	0.11	37.61	0.1330	0.0059
07	6.86	240.96	0.96	140.73	1.7716	0.1780
08	12.19	382.56	5.38	295.75	4.6823	1.6267
09	18.58	544.84	15.48	477.48	10.2070	7.5810
10	19.96	558.99	18.90	530.80	11.1591	10.0320

11	19.88	555.88	19.13	537.92	11.0502	10.2924
12	19.80	554.04	19.27	542.37	10.9774	10.4565
13	19.85	557.44	18.95	534.95	11.0719	10.1454
14	19.80	553.39	18.82	529.06	10.9618	9.9613
15	19.55	553.49	18.06	515.23	10.8609	9.3536
16	14.33	431.70	9.53	360.26	6.7062	4.2070
17	4.88	165.13	0.40	68.28	0.9370	0.0638
18	0.39	51.11	0.00	10.13	0.0223	0.0000
2-Jun	17.41	492.54	15.02	440.41	9.4299	7.8272
06	3.35	172.01	0.16	44.61	1.4319	0.0187
07	17.85	494.23	9.22	362.16	8.8258	3.8841
08	19.43	541.66	18.02	509.22	10.5340	9.1778
09	19.91	553.90	18.82	525.69	11.0270	9.8967
10	19.65	549.09	18.97	531.89	10.8122	10.1315
11	19.89	554.87	19.22	538.47	11.0363	10.3475
12	19.74	552.15	19.19	538.75	10.8999	10.3381
13	19.99	558.67	19.15	537.34	11.1674	10.2893
14	20.06	560.82	18.97	532.58	11.2489	10.1051
15	19.97	558.01	18.72	526.77	11.1446	9.8611
16	19.72	550.31	17.65	510.13	10.8517	9.0194
17	9.00	268.04	1.10	105.89	3.9086	0.2963

18	0.46	53.12	0.00	11.35	0.0261	0.0000
3-Jun	17.44	493.01	14.96	435.44	9.4549	7.8170
06	1.94	123.79	0.12	40.47	0.3852	0.0076
07	17.53	502.03	9.76	346.71	9.1451	4.3005
08	19.36	542.62	16.81	487.47	10.5620	8.4232
09	19.77	549.78	18.64	521.95	10.8713	9.7552
10	19.79	550.91	19.12	534.33	10.9042	10.2164
11	19.91	554.44	19.27	539.14	11.0382	10.3900
12	19.81	552.11	19.32	541.35	10.9377	10.4575
13	20.05	559.55	19.11	536.41	11.2192	10.2483
14	20.03	557.96	19.08	535.13	11.1745	10.2109
15	19.90	554.56	18.82	530.06	11.0413	9.9919
16	19.85	553.93	17.55	508.86	11.0069	9.0018
17	10.27	301.29	0.71	79.28	4.5121	0.1678
18	0.98	57.27	0.00	9.20	0.0638	0.0000
4-Jun	15.80	435.25	12.81	397.79	7.9967	6.6435
06	0.69	85.57	0.06	27.00	0.0853	0.0026
07	6.27	201.90	0.51	105.63	1.3634	0.0706
08	17.26	517.83	10.35	388.79	9.1382	4.4290
09	19.68	519.75	16.13	502.06	10.2389	8.3748
10	20.25	521.62	18.45	540.04	10.5654	9.9663

11	20.14	541.29	19.03	537.81	10.9021	10.2367
12	20.07	547.92	19.45	539.21	10.9965	10.4868
13	20.09	542.92	18.86	530.89	10.9072	10.0134
14	20.14	536.42	18.51	527.53	10.8048	9.7665
15	20.17	530.60	18.25	525.77	10.6999	9.5934
16	17.52	447.01	12.68	425.61	8.2210	6.2436
17	6.34	214.69	0.54	102.75	1.5282	0.0774
18	0.77	57.05	0.00	9.51	0.0516	0.0000
5-Jun	14.82	427.90	12.36	382.85	7.6121	6.2746
06	0.43	43.15	0.00	13.93	0.0222	0.0000
07	3.98	147.69	0.41	100.42	0.6346	0.0465
08	10.02	303.46	4.28	248.04	3.4653	1.4160
09	19.74	553.81	17.75	507.53	10.9363	9.0393
10	20.05	556.74	18.78	524.52	11.1646	9.8513
11	20.07	555.02	19.15	532.98	11.1401	10.2074
12	19.89	551.99	19.31	539.48	10.9774	10.4179
13	19.83	552.23	19.10	535.38	10.9504	10.2300
14	19.82	553.63	18.81	528.99	10.9784	9.9554
15	16.72	499.32	14.20	455.85	8.4035	6.5442
16	16.75	490.13	12.79	427.86	8.4329	5.8323
17	6.68	221.52	0.48	81.52	2.2094	0.0820

18	0.73	56.49	0.00	11.22	0.0461	0.0000
6-Jun	12.17	366.08	9.46	328.42	5.7651	4.6561
06	0.46	54.23	0.06	26.88	0.0314	0.0024
07	2.71	144.27	0.39	98.03	0.4129	0.0433
08	8.34	286.81	3.22	235.96	2.5199	0.8532
09	14.66	437.62	9.97	386.81	6.4904	3.9663
10	18.14	539.71	16.54	497.39	9.8039	8.2553
11	19.06	543.68	18.18	521.73	10.3688	9.4874
12	19.18	542.86	18.54	529.26	10.4232	9.8282
13	20.01	553.41	19.17	534.70	11.0777	10.2533
14	19.78	552.83	18.76	528.04	10.9374	9.9135
15	10.19	318.86	5.02	262.67	3.7125	1.9540
16	6.70	206.48	1.10	165.51	1.4028	0.1916
17	4.17	144.93	0.52	91.93	0.7222	0.0803
18	0.57	48.33	0.00	9.82	0.0302	0.0000
7-Jun	13.98	426.79	11.47	373.93	7.0856	5.6861
06	0.44	62.98	0.07	27.75	0.0340	0.0024
07	4.24	222.28	0.63	105.41	1.1046	0.1003
08	9.97	378.57	4.70	273.44	3.8836	1.4133
09	15.67	486.47	11.93	416.16	7.8278	5.3791
10	19.49	556.68	17.99	518.07	10.8697	9.3562

11	20.20	557.33	19.38	538.95	11.2607	10.4442
12	18.92	535.31	18.43	527.30	10.1355	9.7263
13	17.07	507.28	15.57	479.97	8.7349	7.6211
14	19.39	549.35	18.07	518.85	10.6610	9.4013
15	18.82	539.52	16.99	501.29	10.2156	8.6276
16	14.11	425.06	8.78	345.38	6.6722	3.8196
17	4.05	158.80	0.58	99.12	0.8348	0.0923
18	0.27	32.58	0.00	6.62	0.0098	0.0000
8-Jun	15.38	443.82	12.64	390.88	7.9910	6.5385
06	0.47	65.01	0.06	27.34	0.0424	0.0029
07	5.43	214.05	0.51	108.08	1.2812	0.0670
08	10.86	329.27	2.71	209.60	3.7642	0.8175
09	17.97	529.45	15.63	482.01	9.5650	7.6173
10	19.98	555.13	18.97	533.34	11.0964	10.1218
11	19.25	544.74	18.24	522.84	10.4936	9.5443
12	19.55	547.05	18.99	536.49	10.6999	10.1919
13	19.22	543.12	18.26	521.25	10.5435	9.6354
14	20.23	556.14	19.18	533.82	11.2506	10.2389
15	19.17	532.22	17.57	505.14	10.4656	9.2871
16	19.61	547.77	17.49	508.69	10.8259	9.0451
17	8.76	263.67	0.67	107.31	3.7060	0.1215

18	0.35	45.20	0.00	10.95	0.0181	0.0000
9-Jun	14.39	418.65	11.71	370.40	7.2803	5.9485
06	0.56	46.91	0.00	9.05	0.0326	0.0000
07	4.17	128.98	0.27	65.33	0.6026	0.0312
08	11.34	350.52	5.05	279.69	4.1267	1.6109
09	17.55	518.10	15.08	470.70	9.2371	7.3652
10	19.41	553.67	17.72	513.81	10.7803	9.1583
11	19.70	546.96	18.99	532.04	10.7892	10.1200
12	19.99	550.17	19.50	542.40	10.9990	10.5789
13	19.83	550.02	18.93	530.58	10.9121	10.0495
14	17.22	511.76	15.84	476.44	9.1805	8.0628
15	15.75	462.74	13.02	415.86	8.0080	6.5817
16	16.47	471.50	12.41	405.35	8.4187	6.1505
17	6.99	234.50	0.54	107.22	2.3340	0.0723
18	0.55	45.44	0.00	9.77	0.0285	0.0000
10-Jun	15.33	436.26	12.52	381.44	7.9590	6.4720
06	0.83	68.68	0.05	23.96	0.0705	0.0019
07	4.62	160.64	0.39	95.82	0.7842	0.0430
08	7.54	241.48	1.45	170.62	1.8954	0.3066
09	16.96	501.52	13.85	445.09	8.6827	6.4857
10	19.63	559.90	17.75	510.81	10.9992	9.0798

11	19.92	548.94	19.02	530.95	10.9423	10.1106
12	19.78	546.24	19.27	539.15	10.8058	10.3923
13	19.97	551.76	19.18	536.24	11.0268	10.2936
14	20.33	558.70	19.13	532.96	11.3609	10.1987
15	20.11	555.44	18.74	525.39	11.1685	9.8450
16	20.10	555.16	17.80	511.42	11.1606	9.1273
17	10.20	291.30	0.29	60.55	4.4702	0.0332
18	0.86	48.32	0.00	12.69	0.0490	0.0000
11-Jun	13.80	397.45	11.32	352.60	6.9669	5.7993
06	0.58	59.79	0.05	24.93	0.0437	0.0022
07	3.81	139.51	0.34	88.38	0.5661	0.0336
08	7.10	234.66	1.51	163.43	1.7819	0.3416
09	17.23	519.56	14.40	453.32	9.0883	6.7191
10	19.86	548.79	18.55	519.50	10.9001	9.6403
11	19.98	550.26	19.15	533.80	10.9971	10.2254
12	19.82	547.73	19.30	540.63	10.8551	10.4328
13	19.84	547.75	18.94	531.63	10.8712	10.0751
14	20.03	550.06	18.92	527.66	11.0209	9.9836
15	18.69	527.03	17.07	492.74	10.1291	8.7513
16	12.42	358.76	4.75	230.62	5.3093	2.0124
17	3.08	111.88	0.17	51.32	0.4085	0.0103

18	0.44	36.97	0.00	9.83	0.0172	0.0000
Total, general	14.75	435.40	12.24	386.92	7.6475	6.2816

Nota: Elaboración propia con los datos recolectados de los 25 días, en función de voltaje y corriente.

Anexo 8 Potencia, Radiación y Temperatura Diaria

Tabla 9

Tabla de potencia, radiación y temperatura

FECHA	Prom	Prom	RADIA	T2M_MIN	T2M_MAX	T2M
(2025)	P(w).	P(w).	(KW-	(°C)	(°C)	(°C)
	Pss	Psf	h/m^2/dia)			
17-May	8.1425	6.8085	4.58	18.33	26.87	22
18-May	9.0368	7.4694	5.44	18.55	30.09	23.66
19-May	6.8482	5.4492	2.65	18.72	27.3	22.21
20-May	5.7326	4.6249	3.57	17.28	27.94	22.21
21-May	7.7508	6.4559	2.76	17.43	29.45	22.61
22-May	7.8057	6.3368	3.07	16.79	30.05	22.63
23-May	7.3721	5.9699	3.41	18.45	29.47	22.78
24-May	7.8927	6.5304	4.29	17.79	29.32	22.51
25-May	7.4956	6.1930	3.65	17.49	30.32	22.9
26-May	7.4540	5.9673	4.08	17.92	29.4	22.65
27-May	7.0774	5.8551	4.19	16.73	29.96	22.56
28-May	6.8395	5.6739	3.4	17.39	29.84	22.93
30-May	7.7366	6.4232	3.99	18.33	27.57	21.87
31-May	8.7459	7.3108	4.63	16.76	28.73	21.99
1-Jun	7.6646	6.2599	4.55	16.65	29.6	22.4
2-Jun	9.4299	7.8272	5.62	16.56	28.07	21.19
3-Jun	9.4549	7.8170	5.34	15.97	27.65	20.63
4-Jun	7.9967	6.6435	4.89	16.51	28.3	21.2
5-Jun	7.6121	6.2746	3.75	16.15	27.81	21.13

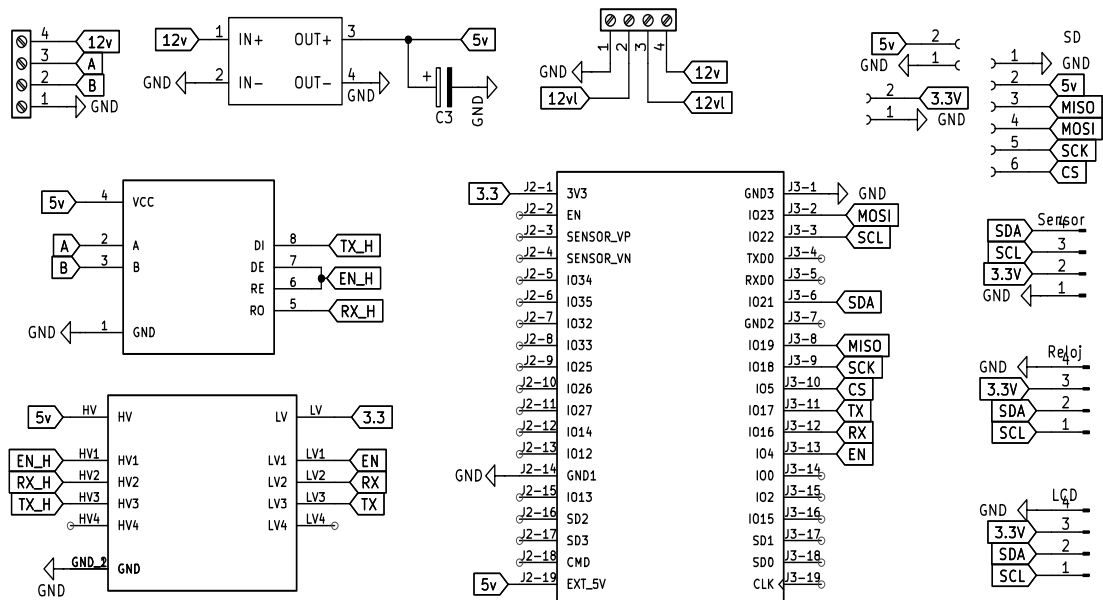
6-Jun	5.7651	4.6561	2.55	16.81	27.03	20.95
7-Jun	7.0856	5.6861	3.42	15.88	26.4	20.31
8-Jun	7.9910	6.5385	4.08	15.63	27.31	20.66
9-Jun	7.2803	5.9485	4.68	16.36	27.11	20.59
10-Jun	7.9590	6.4720	4.63	16.04	26.87	20.39
11-Jun	6.9669	5.7993	4.46	16.02	26.98	20.59

Nota: Elaboración propia, respecto al promedio de potencia diaria, radiación y temperatura

Anexo 9 Diagramas y Placas

Figura 45

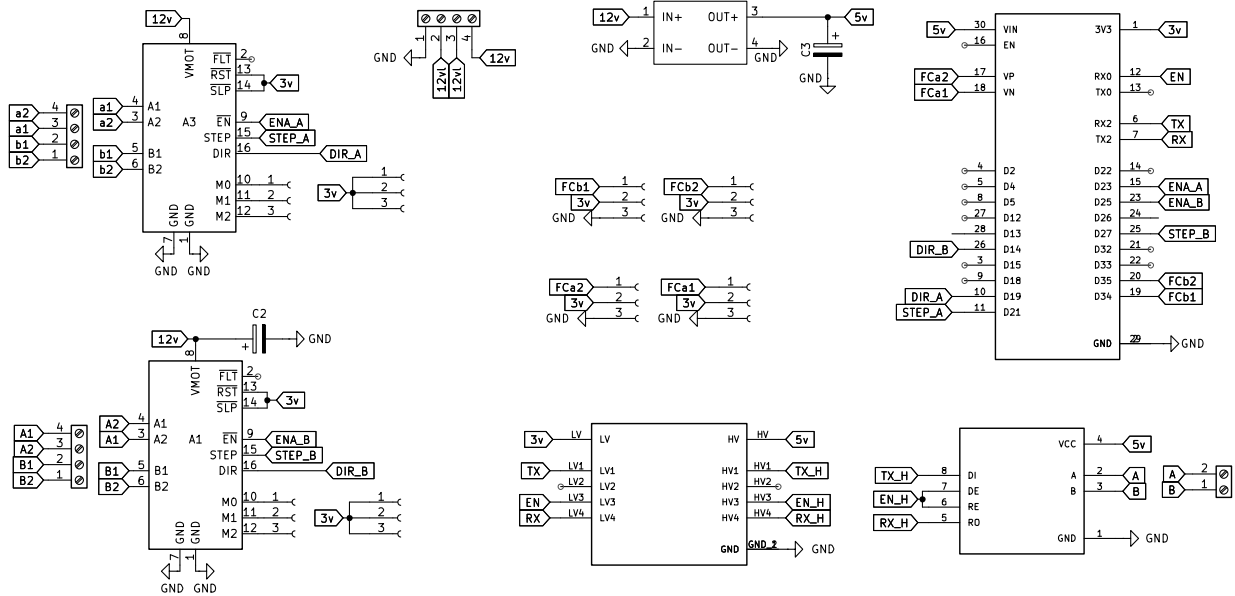
Diagrama de Circuito Electrónico Principal (Emisor)



Nota: Fuente Elaboración Propia

Figura 46

Diagrama de Circuito Electrónico Secundario (Receptor)



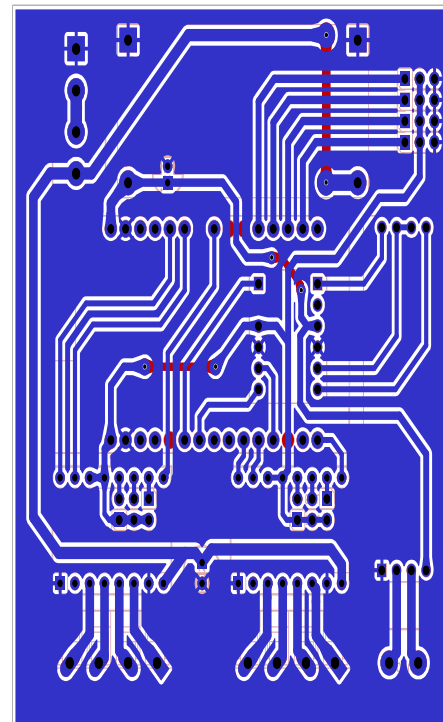
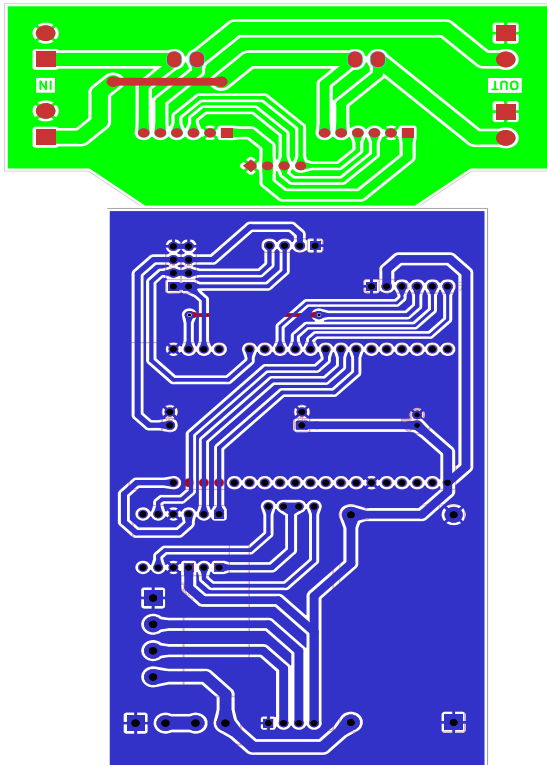
Nota: Fuente Elaboración Propia

Figura 47

Placas electrónicas

principal

secundaria

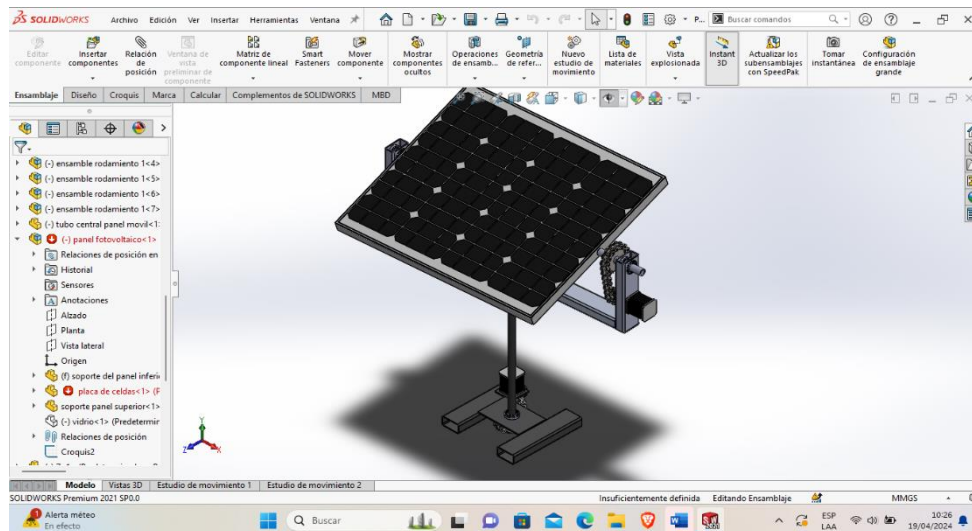


Nota: Fuente Elaboración Propia

Anexo 10 *Sección fotográfica*

Figura 48

Primer diseño en CAD SolidWorks



Nota: Fuente Elaboración Propia en Software CAD SolidWorks

Figura 49

Construcción y Montaje del Panel Fotovoltaico a la Estructura Fija



Nota: Fuente Fotografía Propia

Figura 50

Construcción de la Estructura con Seguidor Solar

(a)



(b)

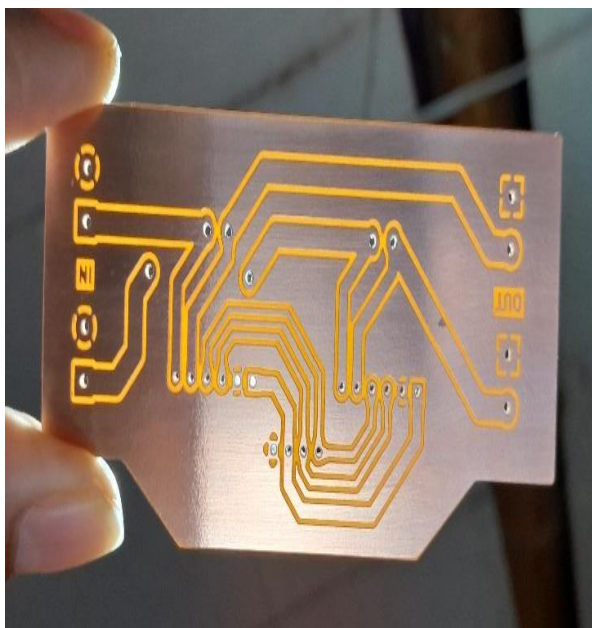


Nota: Fuente Fotografías Propias

Figura 51

Placas electrónicas en PCB

Principal



secundaria

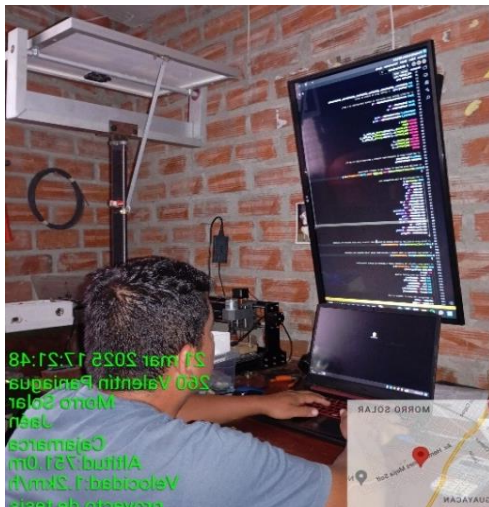


Nota: Fuente Fotografías Propias

Figura 52

Programación e Instalación de Componentes Electrónicos

(a)

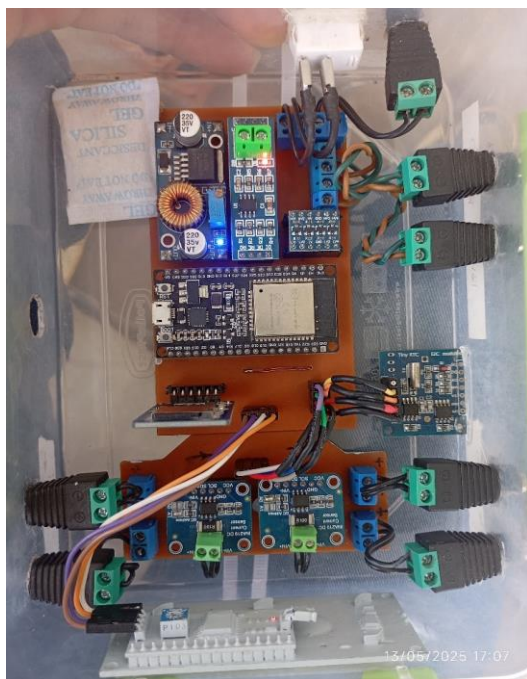


(b)



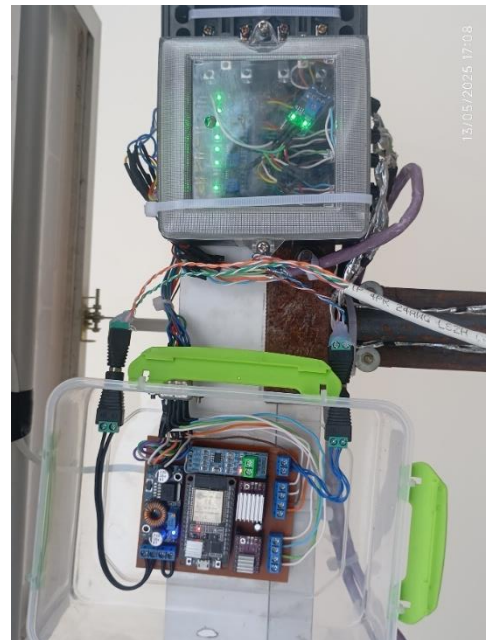
(c)

principal



(d)

secundaria



Nota: Fuente Fotografías Propias

Figura 53

Primeras Pruebas en Lugar de Medición

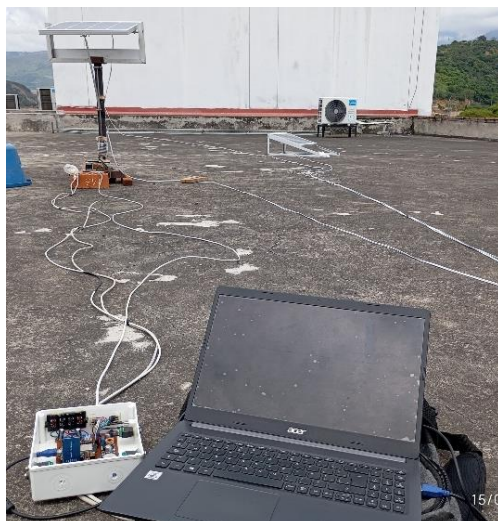
(a)



(b)



(c)



(d)



Nota: Fuente Fotografías Propias

Figura 54

Inspección del lugar para instalación de los paneles solares Pss y Psf



Nota: Fuente Fotografía Propia

Figura 55

Instalación Final y Pruebas de Funcionamiento

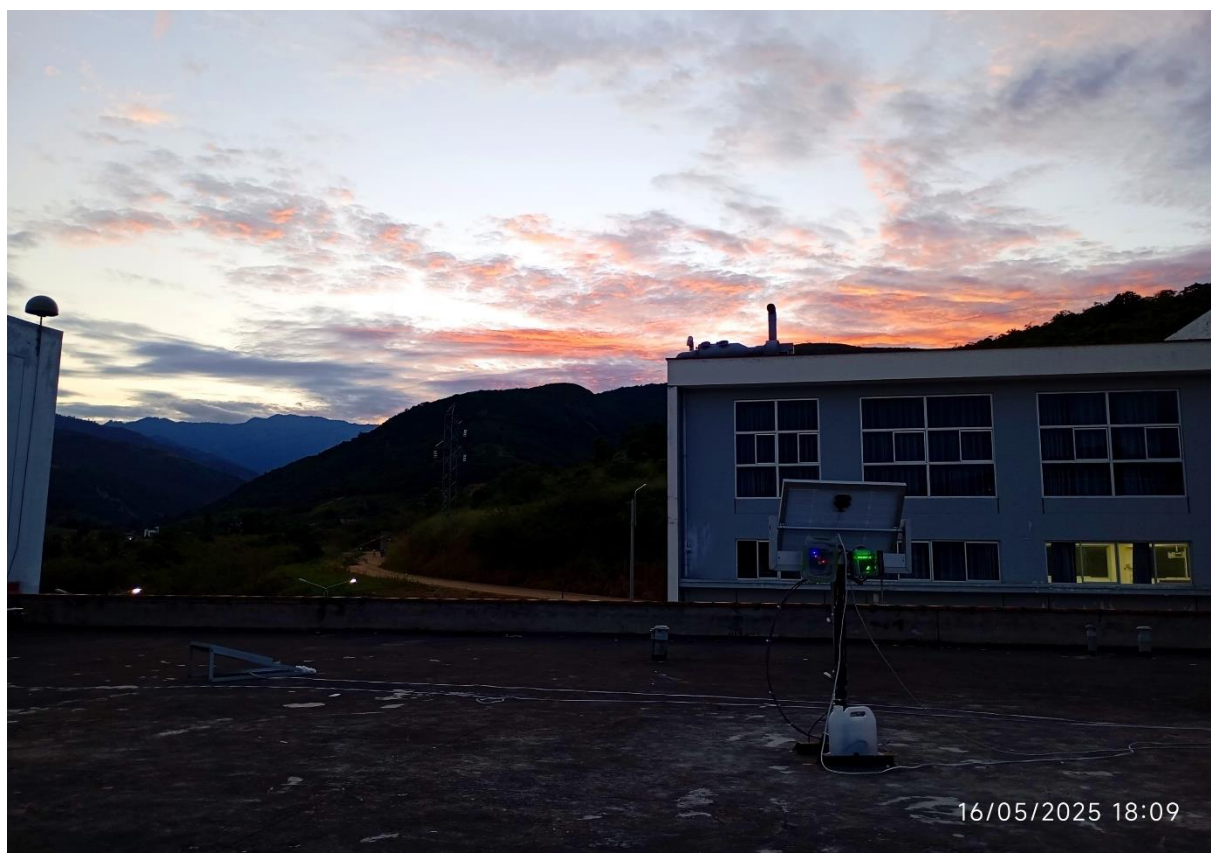
(a)



(b)



(c)



Nota: Fuente Fotografías Propias