



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECÁNICA**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN  
PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO DIFERENTES  
CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTROMECÁNICO

**AUTORES:**

Ronald Omar Orozco Asitimbay  
Franklin Wladimir Toaquiza Chasilagua

**TUTOR:**

Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.

**LATACUNGA, MARZO 2026**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Orozco Asitimbay Ronald Omar y Toaquiza Chasilagua Franklin Wladimir, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN”**, siendo el Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc. tutor del presente proyecto; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente proyecto tecnológico, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



.....  
Orozco Asitimbay Ronald Omar  
C.I. 1600837627



.....  
Toaquiza Chasilagua Franklin Wladimir  
C.I 1751622596

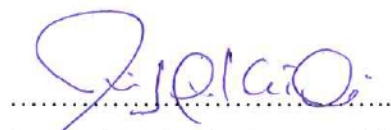
## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutores de la Propuesta Tecnológica sobre el Título:

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN”**, de Orozco Asitimbay Ronald Omar y de Toaquiza Chasilagua Franklin Wladimir, de la carrera de **INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA**, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico – técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS de la Universidad técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2026

Tutor



Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.

C.I. 050259517-6

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo con las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto los postulantes: Orozco Asitimbay Ronald Omar y Toaquiza Chasilagua Franklin Wladimir, con el título de Proyecto de Titulación: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

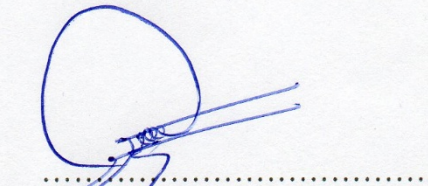
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar el CD correspondiente según la normativa institucional.

Latacunga, marzo 2026

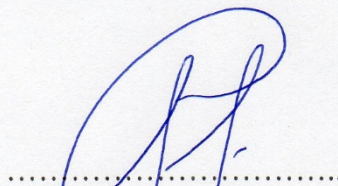
Para constancia firman:

  
.....  
VERÓNICA FREIRE A.

**Lector 1 (Presidente)**  
MsC. Freire Andrade Verónica Paulina  
C.I. 050205622-9

  
.....  
MAURO DARIO ALBARRACIN ALVAREZ

**Lector 2**  
Ing. Albarracín Alvarez Mauro Dario  
C.I. 050311373-0

  
.....  
CARLOS FRANCISCO PACHECO MENA

**Lector 3**  
MsC. Pacheco Mena Carlos Francisco  
C.I. 050307290-2

## ***AGRADECIMIENTO***

*Agradezco principalmente a Dios por darme la salud necesaria para así poder culminar esta etapa en mi vida. Y a mi familia quien siempre estuvo presente con sus palabras de aliento y sus consejos para nunca darme por vencido y así poder alcanzar esta meta*

*-Omar Orozco*

## ***DEDICATORIA***

*Dedico este trabajo principalmente a mi familia quienes fueron un apoyo incondicional, y con sus palabras de motivación y cariño durante todo el tiempo de mi formación académica. A mi madre, Maribel Asitimbay quien ha sido mi mayor fuente de inspiración para poder seguir saliendo adelante a pesar de las adversidades que nos pone la vida. Gracias por brindarme tu apoyo incondicional ya que, sin tus consejos y tu confianza en mí, este logro no hubiera sido posible.*

*-Omar Orozco*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco, en primer lugar, a Dios y a mi Virgencita del Quinche por bendecirme y acompañarme siempre, brindándome la fe y la fortaleza necesaria para no rendirme nunca en este camino. A mis padres, por creer en mí desde el primer día y por otorgarme las herramientas para cumplir este gran sueño, pues su sacrificio es el cimiento de este logro. A toda mi familia, por ser mi motor y el refugio constante donde siempre encontré el apoyo para seguir adelante, y de manera especial a mi hermano mayor, Klever, por ser mi cabeza y mi guía en todo este proceso; su ejemplo y su respaldo incondicional han sido determinantes para mi crecimiento personal y profesional. Gracias por estar siempre para mí.*

- Franklin Toaquiza

## **DEDICATORIA**

*Dedico este logro con profunda gratitud a mis padres, por ser el pilar inamovible de mi vida, por su presencia constante y por haberme sostenido con amor en cada etapa de este camino. A mi Virgencita del Quinche, por su guía espiritual y compañía desde el primer día que la conocí. De manera preeminente y especial, dedico este triunfo a mi hermano mayor, Klever, quien asumió el rol de guía y mentor, criándome con valores íntegros y enseñándome con su ejemplo todo lo que hoy sé para salir adelante; su visión y su respaldo han sido la brújula de mi formación profesional. Asimismo, a mi hermana por su apoyo incondicional, a mi cuñada por ser ese complemento estratégico de visión en mis proyectos, y a mis tres sobrinos, quienes con su alegría sembraron en mí la esperanza y el motivo principal para culminar con éxito este sueño que hoy les entrego.*

*-Franklin Toaquiza*

## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

### FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** “ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN”

**Autores:**

Orozco Asitimbay Ronald Omar

Toaquiza Chasilagua Franklin Wladimir

### RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centró en el desarrollo de un sistema de control y gestión de datos para un arreglo fotovoltaico de 235W, con el objetivo de analizar la influencia del ángulo de inclinación en la captación de energía. El sistema utilizó un controlador Arduino Uno que, mediante un algoritmo de lazo cerrado (PID), gestionó el movimiento de un actuador lineal para modificar la orientación del panel. La interacción se realizó a través de una interfaz HMI que permitió la supervisión de los parámetros eléctricos en tiempo real. Para la adquisición de datos, se implementó una etapa de instrumentación con sensores industriales dotados de aislamiento galvánico, capaces de medir rangos de hasta 250V y 50A. Cada medición se vinculó a una estampa de tiempo mediante un módulo RTC y se almacenó en una memoria MicroSD en formato CSV, permitiendo la creación de una base de datos histórica robusta para el análisis de tendencias estacionales. El diseño mecánico permitió desplazamientos angulares precisos, asegurando que el sistema pudiera posicionarse en los puntos de máxima irradiancia calculados previamente. Los resultados obtenidos, organizados en tablas de validación, demostraron una correlación directa entre la orientación y la potencia generada. Tras contrastar los datos con instrumentos de referencia, se determinó un error relativo inferior al 2%, lo cual validó la fiabilidad del sistema para el monitoreo de la variación energética en condiciones reales.

**Palabras clave:** paneles fotovoltaicos, ángulo de inclinación, parámetros eléctricos, variación.

## TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

### FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**THEME:** “EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTRICAL PARAMETERS IN PHOTOVOLTAIC PANELS UNDER DIFFERENT CONNECTION CONFIGURATIONS AND INCLINATION ANGLE”

**Authors:**

Orozco Asitimbay Ronald Omar

Toaquiiza Chasilagua Franklin Wladimir

### ABSTRACT

This technological proposal focuses on the "Experimental Analysis of Electrical Parameters in Photovoltaic Panels Under Different Connection Configurations and Tilt Angles." This study allows for the evaluation of how these variables influence the electrical behavior and performance of the photovoltaic system. The fundamental parameters considered are voltage, power, and efficiency. This research is based on implementing a system for varying the position of photovoltaic panels using a solar tracker prototype, which makes it possible to analyze the variations of electrical parameters. The tests were conducted by taking into account electrical measurements generated by the panels under real operating conditions, varying the tilt angle with respect to solar radiation and modifying the way the panels are interconnected. These configurations allow us to understand how they affect the magnitude of the voltage and current supplied, which directly impacts the total power produced and the efficiency of the system. Furthermore, the results obtained allow us to identify the most suitable connection configuration according to the load requirements and determine the optimal tilt angle that maximizes solar energy capture. This analysis contributes to improving the design, installation, and operation of photovoltaic systems, optimizing their performance and ensuring greater efficiency in converting solar energy into electrical energy.

**Keywords:** photovoltaic panels, tilt angle, electrical parameters, variation.



UNIVERSIDAD  
TÉCNICA DE  
COTOPAXI



CENTRO  
DE IDIOMAS

## *AVAL DE TRADUCCIÓN*

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: “**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN PANELES FOTOVOLTAICOS BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN**” presentado por: **Ronald Omar Orozco Asitimbay y Franklin Wladimir Toaquiza Chasilagua**, egresados de la Carrera de: **Ingeniería en Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Marzo de 2026

Atentamente,

**Mg. Diana Karina Taipe Vergara**  
**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**  
**CI: 1720080934**



CENTRO  
DE IDIOMAS

## TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	III
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
DEDICATORIA.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
AVAL	
TRADUCCION.....	XI
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	3
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	4
2.3.1 Objeto de acción.....	4
2.3.2 Campo de acción.....	4
2.4 BENEFICIARIOS.....	4
2.4.1 Beneficiarios directos.....	4
2.4.2 Beneficiarios indirectos.....	4
2.5 Justificación.....	5
2.6 OBJETIVOS.....	6
2.6.1 Objetivo General.....	6
2.6.2 Objetivos Específicos.....	6
2.7 CUADRO DE ACTIVIDADES EN RELACION A LOS OBJETIVOS.....	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	7
3.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
3.2 MARCO REFERENCIAL.....	9
3.2.1 Energía solar fotovoltaica.....	9

3.2.2	Paneles solares.....	11
4.	METODOLOGÍA.....	18
4.1	DISEÑO CONCEPTUAL.....	18
4.2	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO.....	19
4.3	DESARROLLO DE CÁLCULOS.....	20
4.3.1	Modelamiento eléctrico del arreglo fotovoltaico.....	20
4.3.2	Dimensionamiento del sistema de medición.....	24
4.3.3	Modelo lineal de conversión de los transmisores a magnitud física.....	25
4.3.4	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL MECANISMO.....	26
4.4	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	30
4.4.1	Pantalla HMI Nextion NX8048T070_011.....	30
4.4.2	Controlador Arduino Uno.....	31
4.4.3	Driver del motor BTS7960.....	32
4.4.4	Sensor de corriente JXDD y el sensor de voltaje JXDC.....	33
4.4.5	Fuente SPB-A120-12.....	35
4.4.6	Gabinete eléctrico.....	36
4.4.7	Encoder BRT38-S06G.....	37
4.5	DESARROLLO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....	38
4.5.1	Esquemático eléctrico.....	38
4.5.2	Desarrollo de la programación.....	40
4.5.3	Diseño del circuito impreso.....	45
4.5.4	Diseño del tablero de control.....	46
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	50
5.1	INTRODUCCIÓN.....	50
5.2	CONFIGURACIÓN EN PARALELO.....	52
5.3	CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	55
5.4	COMPARACIÓN GLOBAL ENTRE CONFIGURACIONES.....	58
5.5	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DESARROLLADO.....	60
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1	CONCLUSIONES.....	61
6.2	RECOMENDACIONES.....	62
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	62
8.	ANEXOS.....	66

1.	INTRODUCCIÓN.....	92
2.	OBJETIVOS.....	92
2.1.	Objetivo general.....	92
2.2.	Objetivos específicos.....	92
3.	EQUIPOS Y MATERIALES.....	92
4.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	93
5.	PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	95
5.1.	Encendido y verificación inicial del sistema.....	95
5.2.	Configuración y operación del sistema.....	98
5.3.	Apagado del sistema.....	100
6.	CONEXIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	101
6.1.	Conexión en paralelo de cuatro paneles fotovoltaicos.....	102
6.2.	Conexión en serie de cuatro paneles fotovoltaicos.....	103
6.3.	Conexión mixta de cuatro paneles fotovoltaicos.....	104
6.4.	Conexión en paralelo de dos paneles fotovoltaicos.....	106
7.	REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES Y MEDICIONES.....	107
7.1.	Configuración en paralelo de dos paneles.....	108
7.2.	Configuración en serie de dos paneles.....	110
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
8.1.	Conclusiones.....	113
8.2.	Recomendaciones.....	114

### INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1:	MODALIDAD DE TITULACIÓN.....	1
TABLA 1.2:	CAMPOS DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA UNESCO.....	1
TABLA 2.1:	CUADRO DE ACTIVIDADES EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS.....	6
TABLA 4.1:	SELECCIÓN DE LA PANTALLA HMI.....	31
TABLA 4.2:	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.....	32
TABLA 4.3:	SELECCIÓN DEL DRIVER DEL MOTOR.....	33
TABLA 4.4:	SENSOR DE CORRIENTE Y VOLTAJE.....	34
TABLA 4.5:	SELECCIÓN DE LA FUENTE DE VOLTAJE.....	35
TABLA 4.6:	SELECCIÓN DE GABINETE ELÉCTRICO.....	36
TABLA 4.7:	SELECCIÓN DE ENCODER.....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR	
FOTOVOLTAICA .....	10
FIGURA 3.2: PANEL SOLAR .....	11
FIGURA 3.3: TIPOS DE PANELES SOLARES.....	12
FIGURA 3.4: COMPOSICIÓN DE LOS PANELES .....	14
FIGURA 3.5: TIPOS DE CONEXIÓN DE PANELES .....	15
FIGURA 3.6: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES.....	15
FIGURA 3.7: CURVA DE INTENSIDAD – TENSIÓN.....	16
FIGURA 3.8: CURVA POTENCIA – TENSIÓN .....	16
FIGURA 3.9: PUNTO MÁXIMO DE POTENCIA .....	17
FIGURA 4.1: ESTRUCTURA DEL DISEÑO CONCEPTUAL.....	19
FIGURA 4.2 DIAGRAMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO .....	20
FIGURA 4.3: CONEXIÓN DE LOS PANELES SOLARES EN SERIE.....	22
FIGURA 4.4: CONEXIÓN DE LOS PANELES SOLARES EN PARALELO.....	24
FIGURA 4.5: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS TRANSMISORES DE VOLTAJE Y CORRIENTE.....	24
FIGURA 4.6: ETAPAS DE CONVERSIÓN DE SEÑAL ANALÓGICA A MAGNITUD FÍSICA.....	25
FIGURA 4.7: REPRESENTACIÓN DEL MECANISMO PLANO A–O–B PARA EL MODELAMIENTO TRIGONOMÉTRICO.....	27
FIGURA 4.8: POSICIÓN DEL MECANISMO CON EL VÁSTAGO DEL ACTUADOR RETRAÍDO.....	28
FIGURA 4.9: POSICIÓN DEL MECANISMO CON EL VÁSTAGO DEL ACTUADOR EXTENDIDO.....	29
FIGURA 4.10: ETAPA DE ALIMENTACIÓN Y REGULACIÓN ELECTRÓNICA.....	38
FIGURA 4.11: ETAPA DE ADQUISICIÓN, CONTROL Y COMUNICACIÓN.....	39
FIGURA 4.12: ENTORNO DE PROGRAMACIÓN EN ARDUINO IDE.....	40
FIGURA 4.13: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL MODO DE OPERACIÓN EN LAZO CERRADO.....	41
FIGURA 4.14: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL MODO DE OPERACIÓN EN LAZO ABIERTO.....	42

FIGURA 4.15: PANTALLA DE INICIO DEL SISTEMA EN LA HMI NEXTION.....	43
FIGURA 4.16: INTERFAZ PRINCIPAL CON SETPOINTS INGRESADOS Y VISUALIZACIÓN ACTIVA.....	43
FIGURA 4.17: PANTALLA DE MONITOREO GRÁFICO DEL ÁNGULO ACTUAL.....	44
FIGURA 4.18: PANTALLA DE MONITOREO GRÁFICO DE LA CORRIENTE.....	44
FIGURA 4.19: PANTALLA DE MONITOREO GRÁFICO DEL VOLTAJE.....	44
FIGURA 4.20: MODELO 3D DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	45
FIGURA 4.21: CIRCUITO IMPRESO.....	45
FIGURA 4.22: DISEÑO INTERNO DEL TABLERO DE CONTROL.....	48
FIGURA 4.23: DISEÑO DEL PANEL FRONTAL.....	49
FIGURA 5.1: MULTÍMETRO DIGITAL FLUKE MODELO 117 TRUE RMS.....	50
FIGURA 5.2: PINZA AMPERIMÉTRICA FLUKE MODELO 376 FC TRUE RMS CLAMP METER.....	51
FIGURA 5.3: MEDIDOR DE INCLINACIÓN SOLAR FLUKE FLK-IRR1-SOL.....	51
FIGURA 5.4: VOLTAJE VS ÁNGULO – CONFIGURACIÓN EN PARALELO.....	53
FIGURA 5.5: CORRIENTE VS ÁNGULO – CONFIGURACIÓN EN PARALELO.....	54
FIGURA 5.6: POTENCIA VS ÁNGULO DE LA CONFIGURACIÓN EN PARALELO.....	55
FIGURA 5.7: VOLTAJE VS ÁNGULO – CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	56
FIGURA 5.8: CORRIENTE VS ÁNGULO – CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	57
FIGURA 5.9: POTENCIA VS ÁNGULO DE LA CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	58
FIGURA 5.10: COMPARACIÓN DE POTENCIA – PARALELO VS SERIE.....	59

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: TABLA DE ECUACIONES.....	67
ANEXO B: HOJA DE DATOS DE LA PANTALLA NEXTION.....	70
ANEXO C: HOJA DE DATOS ARDUINO UNO.....	72
ANEXO D: HOJA DE DATOS DRIVER BTS7960.....	74
ANEXO E: HOJA DE DATOS SENSOR JXDD Y JXDC.....	76
ANEXO F: HOJA DE DATOS FUENTE AUTOMICS SPB A120-12.....	78
ANEXO G: HOJA DE DATOS GABINETE METÁLICO.....	80
ANEXO H: HOJA DE DATOS ENCODER BRT38-S06G.....	83
ANEXO I: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ATMEGA328P.....	85
ANEXO J: GUÍA DE LABORATORIO.....	89

ANEXO K: REGISTRO DE DATOS PARA LA CONFIGURACIÓN EN PARALELO....	115
ANEXO L: CALCULO DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE LA CONFIGURACIÓN EN PARALELO.....	117
ANEXO M: REGISTRO DE DATOS PARA LA CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	119
ANEXO N: CALCULO DE ERRORES EN LA CONFIGURACIÓN EN PARALELO.....	121
ANEXO O: CALCULO DE LA POTENCIA Y EFICIENCIA DE LA CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	123
ANEXO P: CALCULO DE LOS ERRORES DE LA CONFIGURACIÓN EN SERIE.....	125

# 1. INFORMACIÓN GENERAL

## Tema del proyecto:

Análisis experimental de parámetros eléctricos en paneles fotovoltaicos bajo diferentes configuraciones de conexión y ángulo de inclinación.

Tabla 1.1: Modalidad de titulación

Modalidad de titulación	Homologación para informe final de titulación	Selección
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica.	X

*Responsables: Los autores*

## Trabajo de titulación vinculado al proyecto:

Desarrollo de máquinas aplicados a la ingeniería electromecánica

## Equipo de trabajo:

Ronald Omar Orozco Asitimbay	Estudiante
Franklin Wladimir Toaquiza Chasilagua	Estudiante
Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.	Tutor

## Área de conocimiento:

Tabla 1.2: Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

Área del conocimiento	Subárea del conocimiento	Subárea específica del conocimiento
33 Ciencias tecnológicas	3313 tecnologías ingenierías mecánicas	e 3313.15 Diseño de máquinas

## Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ecológica

## Sublíneas de investigación de la carrera:

Energética en sistemas electromecánicos y uso de fuentes renovables de energía

## 2. INTRODUCCIÓN

Los paneles fotovoltaicos actualmente representan una de las tecnologías más importantes dentro del campo de las energías renovables debido a su capacidad de transformar la energía solar en energía eléctrica, dicho proceso se ha convertido en una fuente de energía sostenible, la cual es adaptable para varias aplicaciones y dispositivos que ayudan al funcionamiento de elementos eléctricos, además contribuyen al desarrollo de la naturaleza permitiendo a las plantas mantenerse en condiciones ambientales adecuadas como temperatura, intensidad solar y factores que afectan directamente a su producción y crecimiento.

Para el desarrollo de estas nuevas tecnologías se toma en cuenta la observación de parámetros en los paneles solares, los mismos que son de vital importancia debido a que aportan a su correcto funcionamiento además permiten identificar patrones de comportamiento, cuantificar pérdidas y determinar condiciones óptimas entre los paneles. Los aspectos que se debe tomar en cuenta son la forma como estos se encuentran conectados es decir en serie, paralelos o combinados ya que influyen directamente en los valores de corriente, voltaje y potencia. Es así que al identificar estas diferencias ayudan a establecer criterios de selección adecuada de los paneles especialmente para sistemas o elementos donde se busca maximizar la producción energética garantizando estabilidad ante condiciones ambientales variables.

Otro de los parámetros se basa en la instalación de los paneles donde se toma en cuenta el ángulo de inclinación que determina la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie del panel, esto depende de la latitud, época del año y la forma del ángulo que ayuda al aprovechamiento más eficiente de los rayos del sol.

Por tal motivo el presente proyecto se centra en desarrollar un análisis experimental de los parámetros eléctricos de los paneles fotovoltaicos siendo sometidos a diferentes configuraciones de conexión y variaciones del ángulo de inclinación evaluando así sus efectos eléctricos mediante mediciones y comparaciones donde se busca comprender el impacto de los paneles en la actualidad e identificar las posibles interacciones que contribuirán al establecimiento de conclusiones relacionadas a la optimización de los sistemas fotovoltaicos mejorando de esta manera el aprovechamiento de la energía solar y proporcionando bases sólidas para investigaciones futuras y para aplicaciones relacionadas al ámbito energético.

1.

2.

## 2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La electricidad aparte de ser un servicio muy importante es considerada como un recurso fundamental para el desarrollo de las distintas actividades de una sociedad, por lo que hoy en día es difícil sobrevivir sin energía, sin embargo, algunas áreas rurales carecen de este recurso debido a que no existe una red pública convencional que distribuya la energía hacia los diferentes sitios rurales, es así que estos sitios han visto la necesidad de desarrollar energía eléctrica a través de la captación solar como los paneles solares [1].

En la actualidad los paneles fotovoltaicos son una alternativa viable y eficiente para la generación de una energía más limpia, por lo cual el uso de estos sistemas ha ido aumentando ya sea en sitios residenciales, comerciales e industriales, pero su funcionamiento aún sigue teniendo varios inconvenientes debido a varios factores tanto técnicos como ambientales entre estos están las condiciones climáticas que van variando de acuerdo a cada época del año donde en ocasiones existe lluvias y sombras que provocan la existencia de desbalances eléctricos, caídas de tensión y sobrecalentamientos [2].

Los paneles solares cuentan con factores técnicos que se basan en la manera de configuración de conexión del panel y sobre todo el ángulo de inclinación del mismo con respecto a la radiación solar donde se observa que dichos paneles fotovoltaicos instalados tienen dificultad para lograr un buen rendimiento en la generación de energía solar provocando así una pérdida significativa en la captación solar a lo largo del día lo que limita la potencia para el funcionamiento de elementos y actividades que se desean realizar.

Además, está la falta de información experimental detallada que no permite que los sistemas fotovoltaicos actúen correctamente afectando su desempeño laboral, además la ausencia de análisis comparativos entre las configuraciones y posiciones de los ángulos de inclinación no permite establecer criterios técnicos adecuados para seleccionar la manera y forma de colocación más eficiente de los paneles [3].

Por tanto, la inexistencia de este tipo de estudios limita la capacidad de optimizar las instalaciones solares y diseñar sistemas más eficientes lo cual repercute en el desarrollo de la sostenibilidad y aprovechamiento adecuado de la energía solar evitando así maximizar la

producción energética y minimizar pérdidas tanto económicas como de funcionamiento de los equipos que están conectados a los sistemas fotovoltaicos.

## **2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo varían los parámetros eléctricos característicos como la tensión, corriente, potencia y eficiencia de los paneles fotovoltaicos instalados al modificar el ángulo de inclinación y las configuraciones de conexión tomando en cuenta las condiciones reales de operación?

## **2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.3.1 Objeto de acción**

Análisis experimental de parámetros eléctricos en sistemas de variación como paneles fotovoltaicos

### **2.3.2 Campo de acción**

3306 Ingenierías Tecnologías Eléctricas

## **2.4 BENEFICIARIOS**

### **2.4.1 Beneficiarios directos**

Los principales beneficiarios serán los coordinadores del área de energías renovables quienes son los responsables de la administración y optimización del laboratorio debido a que pueden planificar y actualizar el contenido curricular permitiendo dirigir las actividades técnicas y operativas de manera eficiente, las mismas que son fundamentales para fortalecimiento del conocimiento, logrando así un desarrollo tecnológico adecuado. Además, los coordinadores de área podrán definir estándares educativos orientados a nuevas líneas de investigación e innovación energética a fin de aportar a la formación de los estudiantes.

### **2.4.2 Beneficiarios indirectos**

Son los estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi quienes podrán contar con conocimientos actualizados para el desarrollo de prácticas académicas que les ayudara al correcto desempeño de las actividades, obteniendo así una educación más sólida, moderna y completa relacionada con el sector energético. Además, tendrán acceso a la participación de proyectos y oportunidades en investigaciones donde se aplica la energía fotovoltaica, lo cual

será parte de su formación profesional incrementando su preparación técnica y competitiva logrando un aprendizaje positivo a fin de satisfacer las necesidades académicas.

## **2.5 Justificación**

El presente tema titulado “Análisis experimental de parámetros eléctricos en paneles fotovoltaicos bajo diferentes configuraciones de conexión y ángulo de inclinación” surge de la necesidad de comprender la influencia de la energía solar para la generación de energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos que son una base de apoyo para sitios donde no existe acceso a una red pública debido a la lejanía de los lugares, además esto es una gran motivación que representa una alternativa viable para reducir la contaminación en el medio ambiente, siendo esta una buena estrategia de estudio para el desarrollo del conocimiento y generación de energía eléctrica cuando exista la necesidad de emplearla.

Otro motivo es que en la Universidad Técnica de Cotopaxi existe el área de energías renovables, la cual está a cargo de coordinadores responsables, quienes se encargan de gestionar y dirigir las actividades académicas relacionadas con el uso de energías limpias, proyectos de investigación, eficiencia energética y protección ambiental, a fin de promover la formación profesional a través del desarrollo de prácticas donde se genera la participación activa entre los docentes y los estudiantes, impulsando así el desarrollo institucional por medio de una cultura de sostenibilidad y crecimiento intelectual.

Por lo que el presente tema se fundamenta en la enseñanza y en la creciente necesidad de optimizar la generación de energía mediante la captación del sol a través de paneles, la correcta selección, diseño e instalación del ángulo de inclinación permiten identificar parámetros adecuados que influyen directamente en la generación de corriente, voltaje, potencia y eficiencia para su posterior utilización

Por lo tanto, el análisis experimental de parámetros eléctricos y el ángulo de inclinación permitirá obtener datos exactos que ayuden al correcto funcionamiento de los paneles, mejoramiento del diseño, instalación y el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos, logrando que estos sean colocados en sitios sea residenciales como instalaciones industriales o rurales a fin de tener un aprovechamiento eficiente de la radiación solar. Además, en el contexto académico, el presente proyecto fortalece la formación técnica y científica, proporcionando una base experimental sólida para futuros estudios en eficiencia energética y energías

renovables, lo cual busca generar conocimientos y ofrecer soluciones prácticas que impulsen el uso responsable y eficiente de la energía solar como pilar del desarrollo sostenible.

## 2.6 OBJETIVOS

### 2.6.1 Objetivo General

Implementar un sistema de variación de posición de paneles fotovoltaicos mediante un prototipo de seguidor solar que permita analizar la variación de parámetros eléctricos.

### 2.6.2 Objetivos Específicos

- Revisar información bibliográfica sobre paneles solares mediante consulta en libros y documentos útiles para fundamentar teóricamente los parámetros de los paneles y su ángulo de inclinación.
- Diseñar un prototipo de seguidor solar tomando en consideración los diferentes ángulos de conexión de los paneles a través del desarrollo de un sistema de programación para que ayude a mejorar la captación solar y el rendimiento del panel.
- Implementar el prototipo de seguidor solar de paneles fotovoltaicos mediante la integración de parámetros y ángulos de inclinación, para que ayuden al correcto funcionamiento de los paneles
- Validar el prototipo de seguidor solar y ángulo de inclinación mediante pruebas de funcionamiento que mejoren la captación solar.

## 2.7 CUADRO DE ACTIVIDADES EN RELACION A LOS OBJETIVOS

Tabla 2.1: Cuadro de actividades en relación a los objetivos

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS	TECNICAS E INSTRUMENTOS
Revisar información bibliográfica sobre paneles solares mediante consulta en libros y documentos útiles para fundamentar teóricamente los parámetros de los paneles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de información útil sobre paneles fotovoltaicos</li> <li>• Determinación de los parámetros eléctricos tomando en cuenta su configuración y ángulo de inclinación</li> <li>• Desarrollo del presente proyecto mediante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información clara que aporte al desarrollo del proyecto</li> <li>• Parámetros eléctricos correctamente identificados.</li> <li>• Proyecto claro y adecuado de acuerdo a las necesidades</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación de campo</li> <li>• Determinación de parámetros</li> </ul>

y su ángulo de inclinación.	información relevante obtenida.	expuestas en el tema	
Diseñar un prototipo de seguidor solar tomando en consideración los diferentes ángulos de conexión de los paneles a través del desarrollo de un sistema de programación para que ayude a mejorar la captación solar y el rendimiento del panel.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selección de componentes para el desarrollo del prototipo</li> <li>• Desarrollo del diseño y programación</li> <li>• Identificación del ángulo de inclinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipo realizado de acuerdo a las necesidades.</li> <li>• Diseño y programación previamente establecida</li> <li>• Ángulo de inclinación seleccionado.</li> </ul>	Identificación de componentes Programación adecuada a fin de mejorar la captación solar
Implementar el prototipo de seguidor solar de paneles fotovoltaicos mediante la integración de parámetros y ángulos de inclinación, para que ayuden al correcto funcionamiento de los paneles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocación del prototipo de seguidor tomando en cuenta los parámetros correctos</li> <li>• Identificación de la conexión de los paneles</li> <li>• Establecimiento del mejor ángulo de inclinación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipo de seguidor solar correctamente ubicado</li> <li>• Parámetros establecidos de acuerdo a la mejor opción</li> <li>• Obtención de resultados según el establecimiento del ángulo</li> </ul>	Implementación del seguidor a fin de satisfacer las necesidades Colocación del panel de acuerdo al mejor ángulo Pruebas fotovoltaicas
Validar el prototipo de seguidor solar y ángulo de inclinación mediante pruebas de funcionamiento que mejoren la captación solar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de pruebas de validación y funcionamiento</li> <li>• Identificación del mejoramiento a través de la captación solar</li> <li>• Presentación del prototipo listo mediante el desarrollo de una guía que permita identificar la correcta conexión de los paneles y el ángulo de inclinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de datos importantes y útiles que aportaron a validar el prototipo</li> <li>• Observación del mejoramiento mediante la captación solar</li> <li>• Prototipo desarrollado y listo para su correcto funcionamiento</li> </ul>	Validación de datos Presentación de la guía que ayude a entender la conexión y ángulo de inclinación de los paneles.

*Responsables: Los autores*

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

**3.**

#### **3.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

En el tema “Análisis de sensibilidad como medio de optimización en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red” desarrollado en la Universidad Nacional Autónoma de México, se hace referencia al aprovechamiento de la energía solar como suministro eléctrico para el sector residencial del Valle de México, donde la energía eléctrica ha tenido un alto consumo debido a su utilización y al crecimiento poblacional del sector, por tal motivo se presentó la propuesta de establecer sistemas fotovoltaicos interconectados a la red a fin de reducir costos que se han ido elevando para los moradores del lugar. De tal manera que para el desarrollo del proyecto se tomó en consideración dos aspectos importantes como el estudio energético que ayudó a estimar la cantidad de energía solar producida de manera anual, y el otro aspecto fue el análisis de sensibilidad que se basó en establecer los mejores parámetros para obtener la mayor cantidad de energía solar. En este análisis de sensibilidad para su cumplimiento se empleó diferentes escenarios donde se planteaba un modelo matemático mediante simulaciones que ayudaron a determinar la temperatura del ambiente, características térmicas y eléctricas que deben tener los paneles para su correcta orientación y captación adecuada de energía solar para ser proporcionada en forma de energía eléctrica en el sector residencial de México [4].

En la Universidad Politécnica Salesiana se realizó el “Estudio del comportamiento de paneles fotovoltaicos bajo diversas condiciones climatológicas mediante herramientas de programación” para lo cual se tomó en cuenta condiciones climatológicas específicas como la radiación solar, temperatura, humedad y precipitación que constituyen factores importantes para el funcionamiento de los paneles, ya que si existe cambios estacionales extremos como lluvias intensas y acumulación de polvo, estos afectan directamente a la producción de energía evitando que haya buenos resultados para la obtención de corriente. Para dar cumplimiento al presente estudio se tomó en consideración datos recopilados desde distintas ubicaciones geográficas de la ciudad de Guayaquil, en especial de un sector lejano el cual ha tenido cambios bruscos de temperatura existiendo lluvias fuertes, las mismas que no han permitido que los sistemas de paneles solares ya instalados permitan la generación de energía y su eficiencia lo cual ha ocasionado daños notables en los paneles, gastos costosos en la reparación y reemplazo de los mismos. Es así que el presente proyecto se centró en garantizar la durabilidad y eficiencia

de los paneles solares en un entorno climático desafiante a fin de minimizar los daños causados y establecer áreas adecuadas de ubicación de los paneles a través de herramientas de programación siendo estas las simulaciones y modelos matemáticos que son la base para proponer métodos rigurosos cuidado y colocación de los sistemas fotovoltaicos [5].

De acuerdo con la revista de ingeniería energética el tema “Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica” resulta ser muy novedoso debido al avance de la tecnología que ha ido evolucionando con el pasar del tiempo hasta la actualidad, es por eso que el desarrollo tanto de habilidades como capacidades han permitido el alcance de grandes logros, uno de estos es el uso de la energía renovable a través de fuentes naturales como la luz solar que aporta significativamente a los lugares o zonas que desde la antigüedad no han tenido acceso ya que los sistemas energéticos en esos sitios eran demasiado costosos. Del tal manera que con el desarrollo de la educación se ha ido conociendo nuevas formas de generación eléctrica como la implementación de sistemas fotovoltaicos mediante paneles, los mismos que dependen de varios aspectos entre estos la manera de su colocación, es decir el ángulo de inclinación el cual debe ser puesto mediante la aplicación de datos matemáticos que otorguen un buen acaparamiento de la luz solar si no este llega a tener complicaciones como el no permitir la generación de corriente que ayuda al funcionamiento y control de elementos eléctricos o aquellas actividades relacionadas con la corriente [6].

En conclusión, de acuerdo con los temas anteriormente mencionados se puede decir que los paneles solares actualmente son muy importantes ya que mejoran el desarrollo energético proporcionando una energía más limpia, sostenible y eficiente a partir de la radiación solar, lo cual contribuye significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero y disminución a la dependencia de combustibles fósiles. Además, los sistemas fotovoltaicos favorecen a la autonomía energética debido a que pueden ser instalados en sitios aislados, los mismos que no tienen acceso a una red eléctrica, por lo que son una alternativa viable a largo plazo la misma que impulsa la creación de nuevos empleos fomentando el desarrollo energético y fortaleciendo la seguridad tanto económica como social.

## **3.2 MARCO REFERENCIAL**

### **3.2.1 Energía solar fotovoltaica**

Es una fuente de energía que se encarga de la transformación de los rayos del sol en energía eléctrica, empleando la tecnología basada en el efecto fotovoltaico, el cual utiliza elementos o

módulos fotovoltaicos como paneles o placas solares los mismos que se caracterizan por poseer celdas que al recibir la luz solar de manera directa estas se ionizan y liberan electrones que al interactuar entre sí generan corriente eléctrica [7].

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado se puede decir que la energía solar fotovoltaica es aquella que se encarga de captar directamente la luz solar y transformar los rayos del sol en energía eléctrica a partir del uso de módulos fotovoltaicos, los mismos que interactúan entre sí para generar electricidad.

### **3.2.1.1 Funcionamiento de la energía solar fotovoltaica**

El funcionamiento de la energía solar fotovoltaica se basa en convertir la energía, aprovechando al máximo la luz solar y convirtiéndola en una solución eficaz para la obtención de corriente o energía eléctrica. Este proceso ocurre gracias al efecto fotovoltaico donde los fotones de la luz solar excitan los electrones del material semiconductor generando un flujo de corriente eléctrica continua, reduciendo así la dependencia fuentes convencionales y aprovechando los recursos naturales

- Los sistemas fotovoltaicos son colocados de acuerdo a las necesidades del consumidor tomando en cuenta la dirección del sol
- Una vez establecido el lugar de posicionamiento, las células fotovoltaicas de los paneles se encargan de absorber la suficiente luz solar por medio de electrones
- Los electrones del material semiconductor se liberan cuando las células fotovoltaicas han recibido la suficiente luz generando así corriente continua
- La corriente continua pasa por un inversor para convertirse en corriente alterna la cual permite el funcionamiento de dispositivos eléctricos y electrónicos
- La corriente alterna se suministra para viviendas o edificios, es decir es empleada para el uso de elementos que demandan gran cantidad de corriente eléctrica.

### **3.2.1.2 Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica**

En la Figura 3.1 se puede observar las ventajas y desventajas de obtener energía solar fotovoltaica.

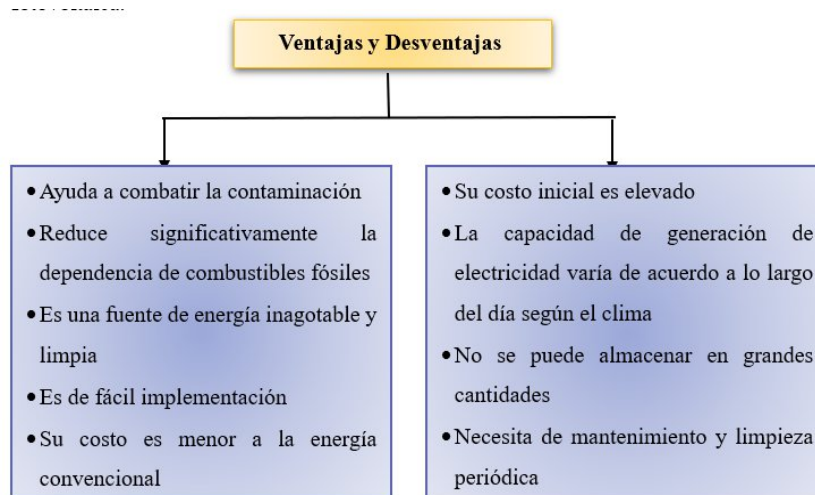


Figura 3.1: Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica [8]

### 3.2.2 Paneles solares

En la figura 3.2 se puede observar que los paneles solares son dispositivos tecnológicos conocidos como módulos fotovoltaicos, los cuales están diseñados para captar la radiación electromagnética proveniente del sol y transformarla en energía eléctrica útil, además pueden ser empleados para la obtención de energía térmica la cual aprovecha el calor producido por la radiación solar en aplicaciones como el calentamiento del agua o de sistemas de climatización. Los paneles solares representan una fuente de energía renovable, limpia y sostenible debido a que contribuyen a la reducción del uso de combustibles fósiles

La implementación de los paneles solares es muy utilizada en sectores residenciales, industriales y rurales especialmente en zonas donde el acceso a la red eléctrica es limitado o se carece de este recurso por lo que con esto se busca mejorar la eficiencia energética reduciendo el impacto ambiental [9].

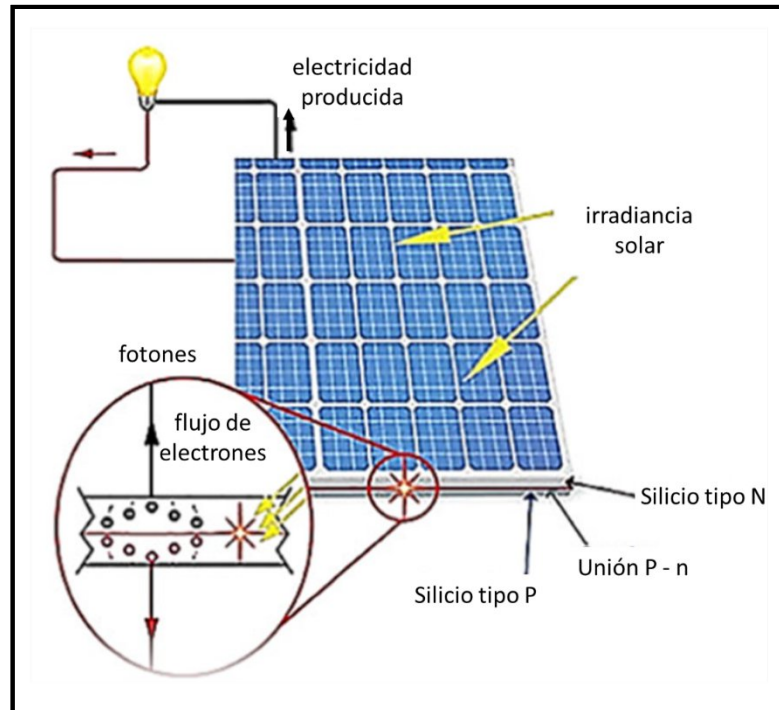


Figura 3.2: Panel solar [10]

### 3.2.2.1 Tipos de paneles solares

Existen distintos tipos de paneles solares como se puede ver en la figura 3.3, los cuales están fabricados mediante materiales como el silicio que ayuda a tener un proceso constante y eficiente en la captación solar, entre estos tipos de paneles tenemos:

- **Paneles monocristalinos:** Son elaborados con cristal de silicio puro, tienen una eficiencia entre el 17% y 20%, se caracteriza por producir más energía en menor superficie, son los más utilizados debido a su gran confiabilidad y periodo de vida útil, además se distinguen por su aspecto de uniformidad y por tener un costo muy elevado debido a las prestaciones que ofrecen.
- **Paneles policristalinos:** Su fabricación es más simple por lo que son más baratos en el mercado, tienen una eficiencia del 13% al 15% y se identifican por tener un patrón aleatorio de cristalización por lo que su aspecto no es uniforme.
- **Paneles amorfos:** Tienen una estructura muy ligera, se caracterizan por ser muy baratos y flexibles por lo que pueden ser instalados en múltiples superficies, además tienen una eficiencia del 10% lo que afecta al desarrollo de su rendimiento [11].



Figura 3.3: Tipos de paneles solares [11]

### 3.2.2.2 Composición de los paneles

Los paneles solares están compuestos por varias células fotovoltaicas conectadas entre sí, y están encapsuladas entre capas protectoras y enmarcadas para su instalación como se indica en la figura 3.4. Entre los principales componentes de los paneles solares tenemos:

- **Células fotovoltaicas:** Son conocidas también como células solares o fotoeléctricas, son el elemento fundamental de los paneles, que se caracterizan por ser dispositivos electrónicos fabricados con materiales semiconductores principalmente de silicio que tienen la capacidad de convertir la energía proveniente del sol en energía eléctrica. Las células fotovoltaicas están diseñadas con una estructura específica que tienen capas positivas y negativas encargadas de crear un campo eléctrico interno que permite el movimiento ordenado de los electrones y la generación de energía eléctrica utilizable.
- **Encapsulante:** Es un material especializado que se emplea en la fabricación de paneles solares, sirve como capa protectora actuando como sellador uniendo firmemente las células solares al vidrio frontal y a la lámina posterior, a fin de proteger a las células solares de la humedad y de la degradación ambiental [12].
- **Lámina posterior:** Se encarga de proporcionar aislamiento eléctrico y protección adicional a las células solares permitiendo mantener la rigidez del panel, constituye una barrera actuadora ante posibles daños sean ambientales o contaminantes. La lámina posterior proporciona una capa protectora en la cara opuesta al sol, esta suele estar compuesta de materiales como poliéster que contribuyen a la integridad estructural y al tiempo de duración de los paneles [13].

- **Vidrio frontal:** Conocido también como vidrio solar, se identifica por ser un material innovador que combina las propiedades de un panel solar con las características estéticas y funcionales de un vidrio. Puede ser usado también en aplicaciones arquitectónicas como ventanas, fachadas donde se logra generar electricidad a partir de la energía del sol, esta corriente es recogida mediante conexiones en los bordes del vidrio y puede ser usada para alimentar dispositivos electrónicos o ser inyectada a la red eléctrica [14].
- **Marco:** Se encarga de mantener unidas todas las capas internas o partes del panel solar dando soporte y rigidez a su estructura protegiéndolo de los demás elementos externos como lluvia, viento. El marco de un panel se encuentra fabricado de aluminio anodizado que ayuda a combatir la corrosión, además ayuda a minimizar riesgos de rompimiento del panel solar [15].
- **Caja de conexión:** Se ubica en la parte de atrás del panel se encarga de proteger las conexiones del panel para la transferencia de energía y se caracteriza por conectar con circuitos externos, cuentan con resistencia al polvo y al agua [15].

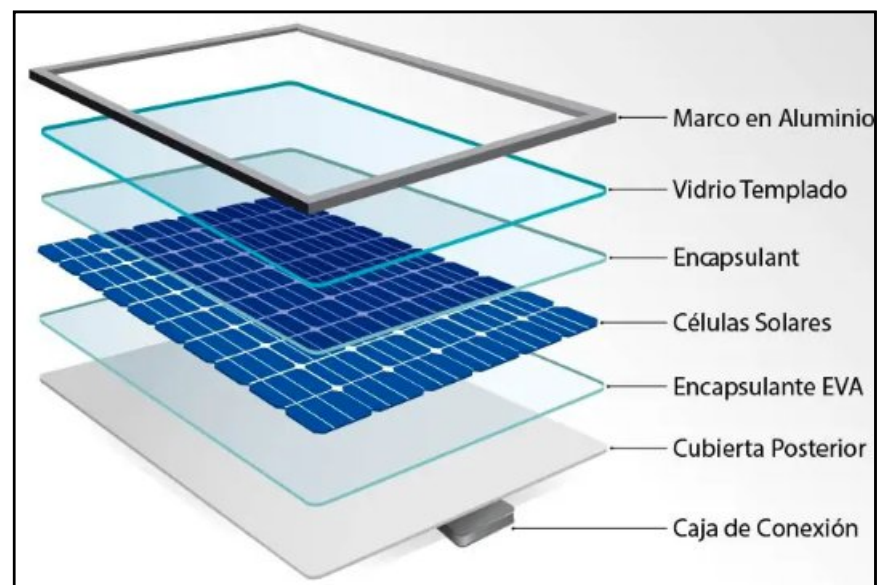


Figura 3.4: Composición de los paneles [16]

### 3.2.2.3 Conexión de los paneles

La conexión de paneles fotovoltaicos hace referencia a la forma como estos se interconectan eléctricamente entre sí, a fin de obtener un voltaje y corriente adecuados para el funcionamiento de equipos y elementos eléctricos. Existen tres formas de conexión de paneles esto podemos ver en la figura 3.5:

- **Conexión en serie:** Es una forma de interconexión de los paneles uno después del otro, donde el terminal positivo de un panel se conecta con el terminal negativo del siguiente formando una sola cadena de modo que el voltaje total del sistema aumenta mientras que la corriente se mantiene constante. La desventaja de este tipo de conexión se puede dar en un solo panel debido a que si llega a fallar se puede caer todo el sistema.
- **Conexión en paralelo:** Se basa en unir los terminales positivos y terminales negativos de los paneles entre sí, formando un solo conjunto a fin de mantener el voltaje constante y aumentar la corriente total del sistema.
- **Conexión mixta:** Es la combinación de los paneles tanto en serie como en paralelo a la vez, tomando en consideración el mismo número de paneles entre las dos partes, obteniendo así condiciones de intensidad y de voltaje cuando se requiera llegar a la carga específica para su utilización [15].

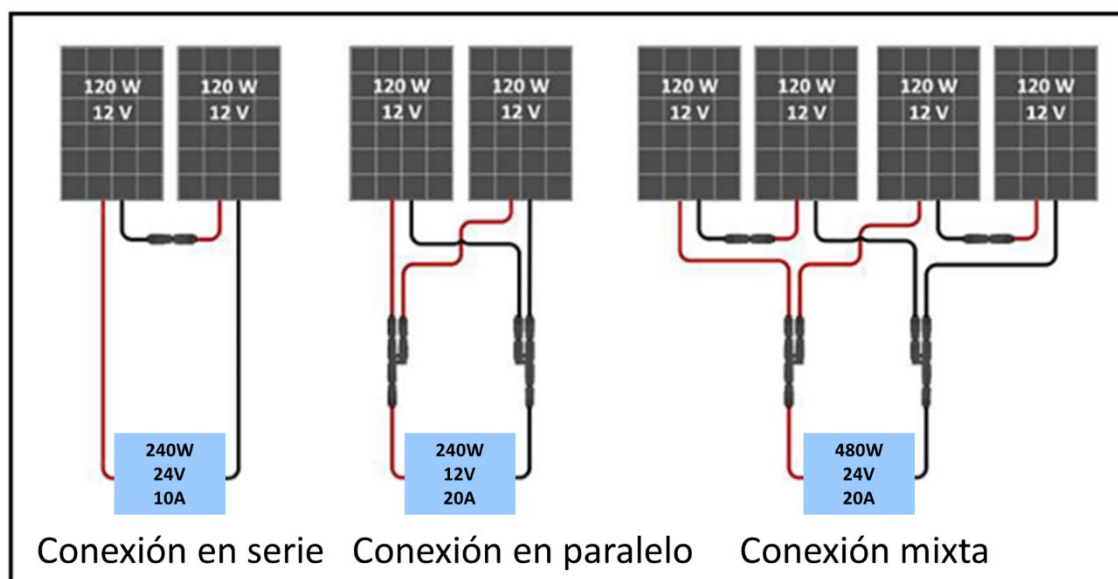


Figura 3.5: Tipos de conexión de paneles [16]

### 3.2.2.4 Principios de funcionamiento

Los principios de funcionamiento de los paneles solares se basan en una serie de fenómenos físicos y eléctricos que permiten convertir la energía de la radiación solar en energía eléctrica utilizable de forma eficiente y directa. Estos principios ocurren gracias a la interacción de la luz solar y los materiales semiconductores que conforman las células fotovoltaicas garantizando el aprovechamiento de fuentes de energía renovable y permitiendo el uso de energía eléctrica para cualquier equipo eléctrico o electrónico.

Los principios de funcionamiento de los paneles solares según la figura 3.6 tenemos:

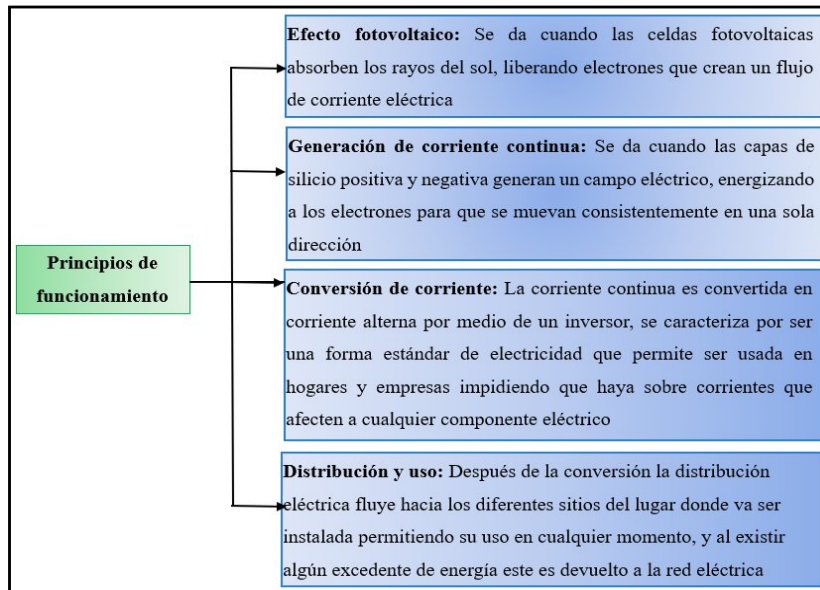


Figura 3.6: Principios de funcionamiento de los paneles [19]

### 3.2.2.5 Curvas de funcionamiento de los paneles

Son representaciones gráficas que muestran la relación que existe entre la corriente, la tensión y el voltaje, por lo que muestran el comportamiento eléctrico y el rendimiento tomando en cuenta condiciones de irradiancia y temperatura.

- **Curva Intensidad – Tensión:** La figura 3.7 muestra como varía la intensidad de corriente al cambiar la tensión, nos muestra el rendimiento del panel desde la máxima corriente con tensión cero hasta la máxima tensión con corriente cero [20].

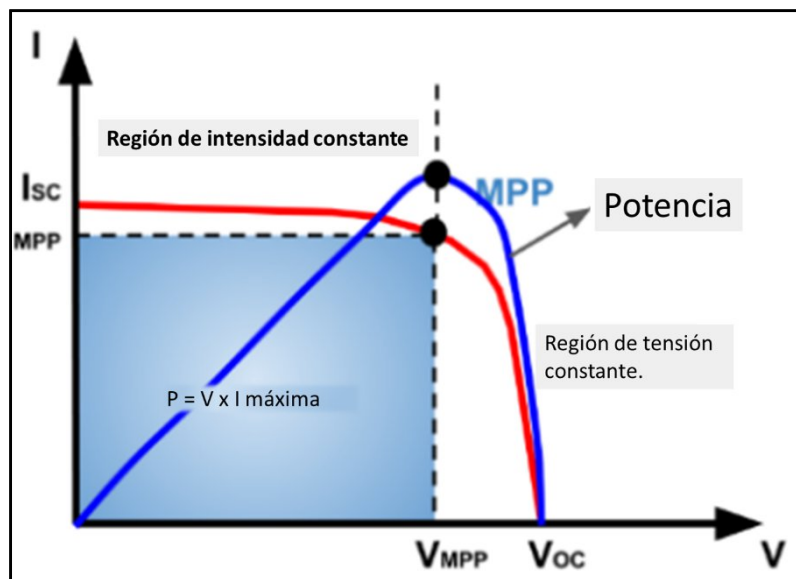


Figura 3.7: Curva de intensidad – Tensión [20]

- **Curva de Potencia – Tensión:** La figura 3.8 representa la potencia frente al voltaje o tensión del mismo, permitiendo identificar el punto máximo de la potencia, es decir donde el panel produce una energía optima [20].

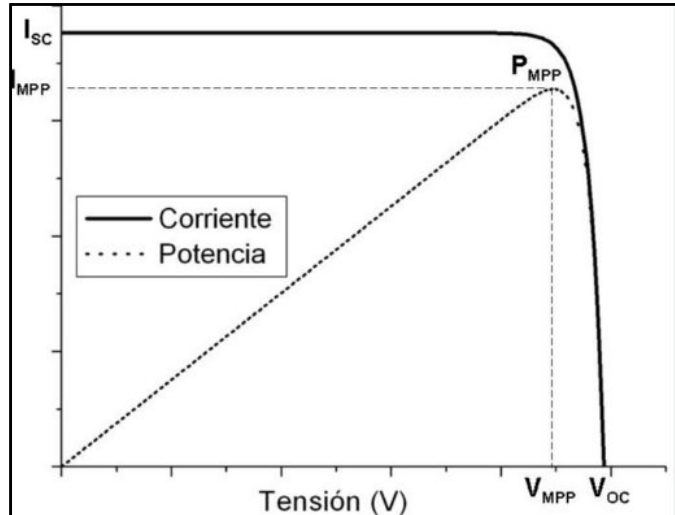


Figura 3.8: Curva Potencia – Tensión [21]

- **Punto Máximo de potencia (MPP):** Es el punto máximo de la curva donde el producto de la corriente y la tensión es máximo, lo que muestra las condiciones más altas y optimas de trabajo como se muestra en la figura 3.9 [20].

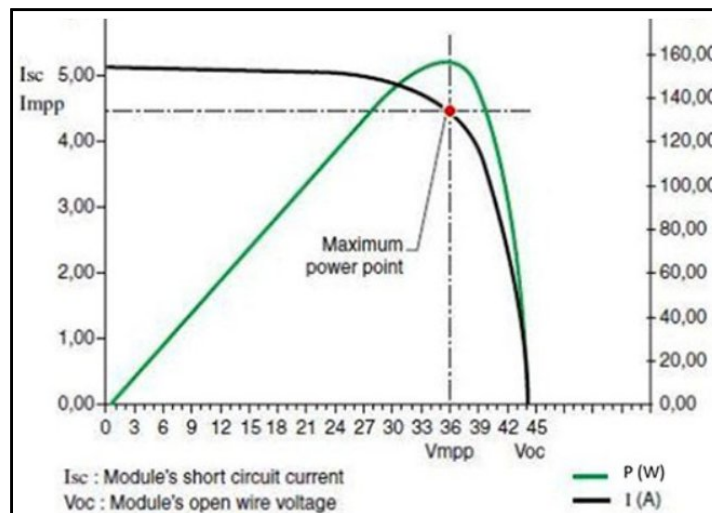


Figura 3.9: Punto máximo de potencia [22]

### 3.2.2.6 Factores que influyen en los paneles

Para el correcto funcionamiento de los paneles se debe tomar en consideración algunos factores importantes que ayudan al buen desempeño de las máquinas y equipos eléctricos, estos factores se basan en la eficiencia, orientación y el ángulo de inclinación de los paneles.

- **Eficiencia:** Es conocida también como rendimiento, esta es de vital importancia en la conexión de los paneles debido a que define la cantidad de potencia que se obtiene del mismo, mientras que mayor energía solar incida sobre el panel esta es convertida en energía eléctrica logrando eficiencias típicas del 20 %, mientras que la fracción restante de la energía incidente se disipa principalmente en forma de calor y pérdidas ópticas y eléctricas.
- **Orientación:** Hace referencia a la dirección a la cual deben colocarse los paneles respecto a los puntos cardinales, sirve para maximizar la eficiencia y producción de energía de un sistema fotovoltaico con el propósito de reducir en el rendimiento eléctrico.
- **Intensidad de la radiación solar:** Representa la cantidad de radiación que ofrece el sol donde indica que, a mayor irradiancia solar, la corriente aumenta significativamente desplazándose la curva hacia arriba
- **Condiciones ambientales:** Son todos los factores climáticos y atmosféricos que pueden afectar directamente a los paneles solares, siendo estos la lluvia, polvo, humedad sombra y viento. Estos provocan la reducción de funcionamiento en los paneles solares disminuyendo así su rendimiento y nivel de voltaje.
- **Ángulo de inclinación:** Representa el grado de dependencia de cómo se colocan los paneles con respecto a la superficie horizontal, tomando en consideración la línea ecuatorial el ángulo de inclinación va de 10° a 15° grados según la necesidad de producción de energía [15].

#### 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso de diseño, adecuación mecánica, integración eléctrica–electrónica, programación y validación experimental de un prototipo de variación de posición para paneles fotovoltaicos (seguidor solar de un eje) orientado a ejecutar ensayos comparativos de parámetros eléctricos (tensión, corriente, potencia y eficiencia relativa) bajo diferentes configuraciones de conexión (serie, paralelo y mixto) y diferentes ángulos de inclinación.

La metodología se estructuró en etapas secuenciales: identificación de la situación actual del banco fotovoltaico y sus parámetros nominales; diseño e implementación de un sistema de medición y control basado en Arduino, con interfaz HMI Nextion, protecciones y bornerización; modelamiento matemático del movimiento y su conversión ángulo–desplazamiento del actuador; implementación del control de posicionamiento entre 08h00 y 17h00. Para el análisis experimental del sistema se estableció un intervalo angular de trabajo entre  $-30^\circ$  y  $+30^\circ$ , correspondiente al rango de operación mecánica.

#### **4.1 DISEÑO CONCEPTUAL**

El sistema se concibió como un prototipo de variación angular de un eje destinado al análisis experimental de arreglos fotovoltaicos, en el cual se integraron de forma coordinada elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos que permitieron modificar la inclinación del conjunto de paneles y registrar su comportamiento eléctrico; En la Figura 4.1 se detalla que el proceso se estructuró en un subsistema fotovoltaico conformado por cuatro paneles montados sobre una estructura móvil común, un subsistema de actuación encargado del desplazamiento angular mediante un actuador lineal de corriente continua con realimentación de posición, un subsistema de medición que permite la adquisición de magnitudes eléctricas fundamentales del arreglo, y un subsistema de control centralizado que gobierna el movimiento, la adquisición de datos y la supervisión general del prototipo, lo cual aseguró condiciones de operación repetibles y controladas para el desarrollo de los ensayos experimentales.

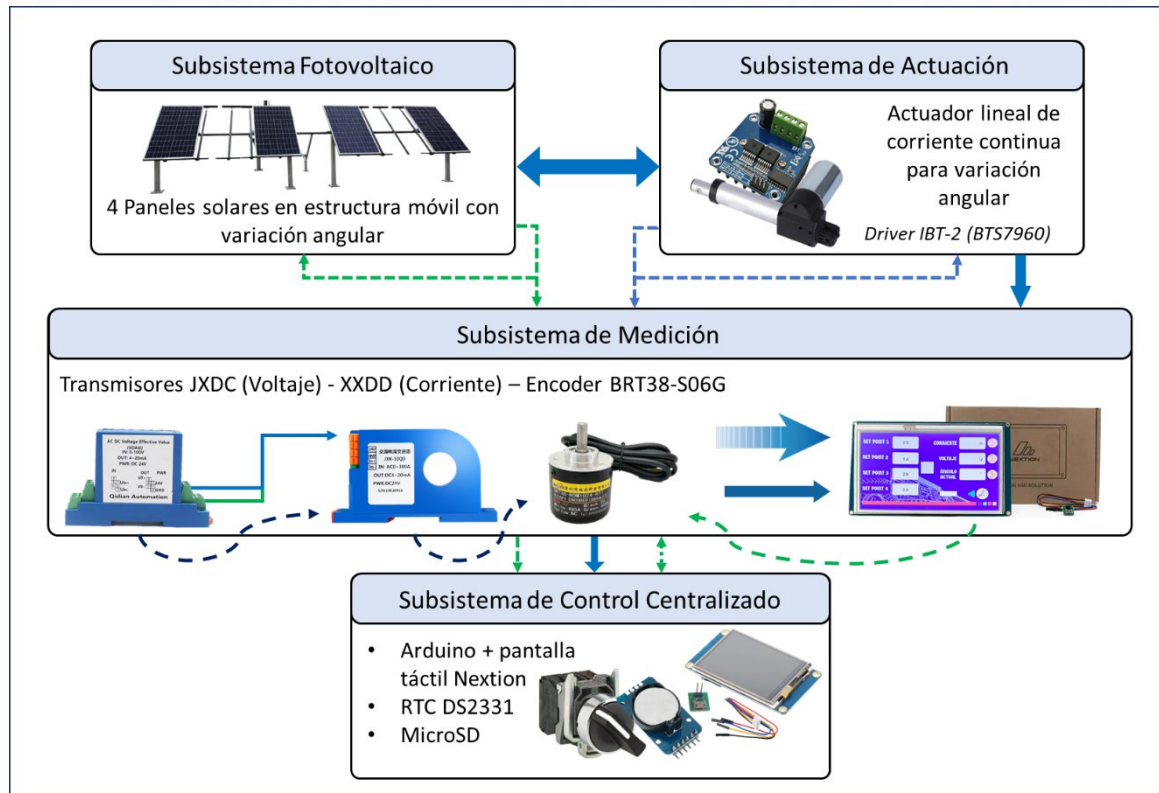


Figura 4.1: Estructura del diseño conceptual.

## 4.2 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO

El diagrama básico de funcionamiento que se ilustra en la Figura 4.2 y representa la secuencia lógica y funcional del sistema de variación de posición y medición del arreglo fotovoltaico, donde el controlador central recibe como entradas las variables de referencia necesarias para la ejecución del proceso, así como las señales provenientes de los dispositivos de medición; el microcontrolador procesa estas señales y ejecuta los algoritmos de control que determinan el posicionamiento del panel mediante el accionamiento del actuador lineal, estableciendo la relación entre el desplazamiento del émbolo y el ángulo de inclinación alcanzado; de forma simultánea, las magnitudes eléctricas del arreglo fotovoltaico, como tensión y corriente, son adquiridas a través de los transmisores correspondientes y visualizadas en la interfaz HMI, permitiendo el cálculo y monitoreo de parámetros derivados como la potencia eléctrica; a partir de esta información, el operador selecciona de manera manual la configuración de conexión de los paneles, ya sea en serie o en paralelo, mediante el conexionado físico en las borneras, lo que habilita la ejecución de ensayos bajo diferentes condiciones de inclinación; finalmente, el sistema entrega el posicionamiento controlado del conjunto fotovoltaico, expresado en términos de desplazamiento del actuador y ángulo de inclinación, junto con la visualización en tiempo real de los parámetros eléctricos relevantes para el análisis experimental.

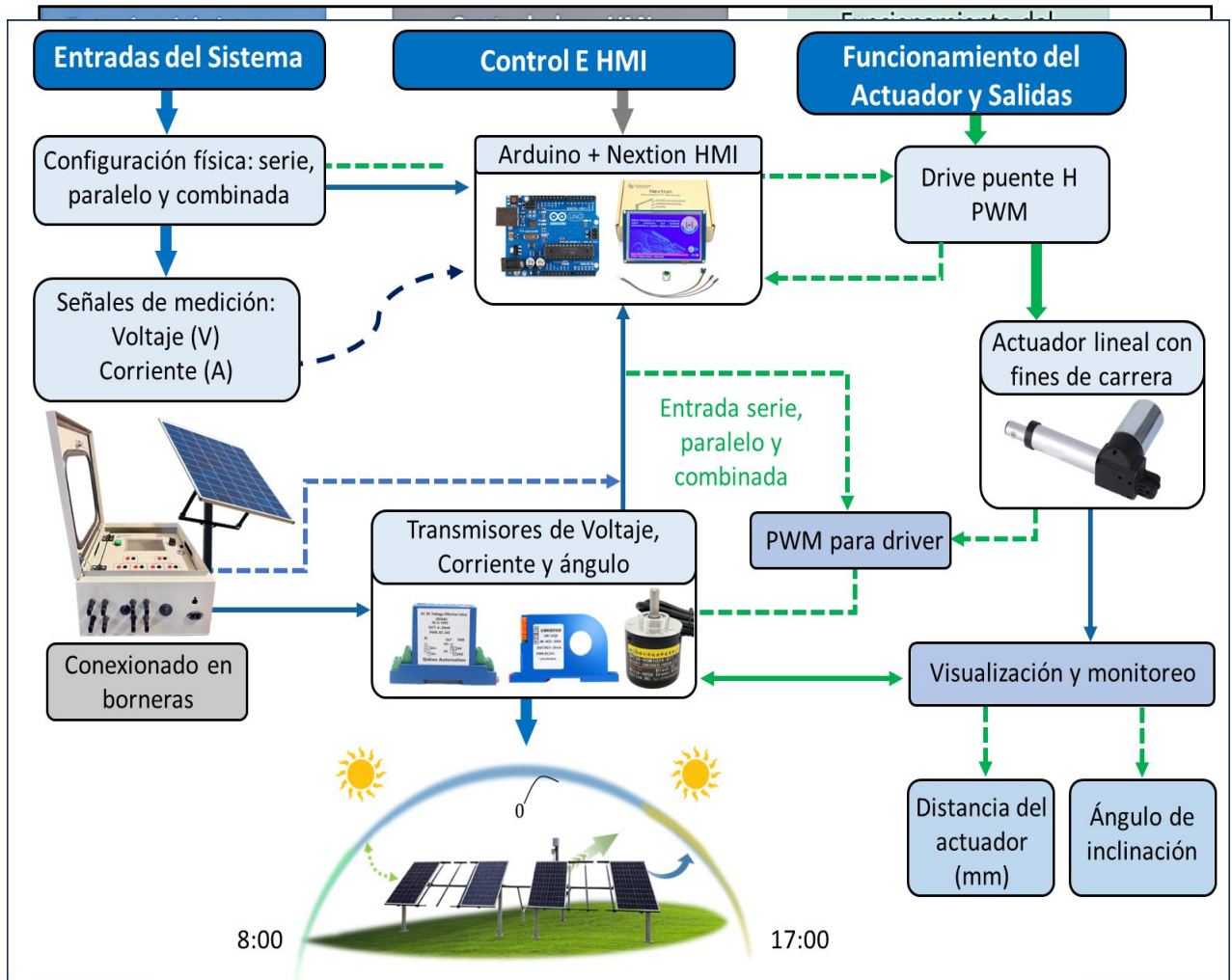


Figura 4.2 Diagrama básico de funcionamiento

### 4.3 DESARROLLO DE CÁLCULOS

#### 4.3.1 Modelamiento eléctrico del arreglo fotovoltaico

La configuración de conexión serie, paralelo o mixto no modifica el modelamiento mecánico del seguidor, pero sí determina la magnitud de voltaje y corriente del arreglo, por lo que interviene directamente en el cálculo de potencia y en el dimensionamiento del sistema de medición. El proceso de obtención del modelamiento matemático se detalla de forma organizada en el Anexo A, para el análisis eléctrico se asume que los cuatro módulos son iguales y operan bajo condiciones similares, lo cual permite utilizar sumatorias ideales como primera aproximación.

Para cada panel fotovoltaico utilizado se consideraron parámetros nominales de placa:

- Potencia nominal en MPP:  $P_{mp} = 235 \text{ W}$
- Voltaje a potencia máxima:  $V_{mp} = 29,1 \text{ V}$
- Corriente a potencia máxima:  $I_{mp} = 8,08 \text{ A}$
- Voltaje en circuito abierto:  $V_{oc} = 37,4 \text{ V}$
- Corriente de cortocircuito:  $I_{sc} = 8,66 \text{ A}$
- Fusible máximo en serie del módulo:  $I_{fm} = 15 \text{ A}$

#### 4.3.1.1 Conexión en serie (4 paneles)

En una configuración en serie, los voltajes de los módulos fotovoltaicos se suman, para determinar el voltaje total del arreglo en serie se emplea la Ecuación 1:

$$V_{mp_{serie}} = 4 \times V_{mp}$$

Ecuación 1

$$V_{mp_{serie}} = 4 \times 29,1 \text{ V}$$

$$V_{mp_{serie}} = 116,4 \text{ V}$$

Por otra parte, la corriente del sistema en conexión serie permanece igual a la corriente de un solo módulo. Esta relación se determina mediante la Ecuación 2:

$$I_{mp_{serie}} = I_{mp}$$

Ecuación 2

$$I_{mp_{serie}} = 8,08 \text{ A}$$

La potencia total del arreglo se obtiene mediante el producto entre el voltaje y la corriente del sistema como lo describe la Ecuación 3:

$$P_{mp_{serie}} = V_{mp_{serie}} \times I_{mp_{serie}}$$

Ecuación 3

$$P_{mp_{serie}} = 116,4 \text{ V} \times 8,08 \text{ A}$$

$$P_{mp_{serie}} = 940,5 \text{ W} \approx 940 \text{ W}$$

Para determinar el voltaje en circuito abierto del arreglo en serie se utiliza la Ecuación 4, donde el voltaje total corresponde a la suma de los voltajes de circuito abierto de cada módulo:

$$V_{oc_{serie}} = 4 V_{oc}$$

Ecuación 4

$$V_{oc_{serie}} = 4 \times 37,4 = 149,6V$$

La corriente de cortocircuito en conexión serie se mantiene igual a la de un módulo individual, lo cual se determina mediante la Ecuación 5:

$$I_{sc_{serie}} = I_{sc}$$

Ecuación 5

$$I_{sc_{serie}} = 8,66A$$

En serie se incrementa el voltaje del arreglo lo cual beneficia aplicaciones que requieren mayor tensión, mientras la corriente permanece en el orden de un solo módulo como se ilustra en la Figura 4.3. Para el sistema de medición, esta configuración exige que el transmisor de voltaje soporte al menos  $V_{oc_{serie}}$ .

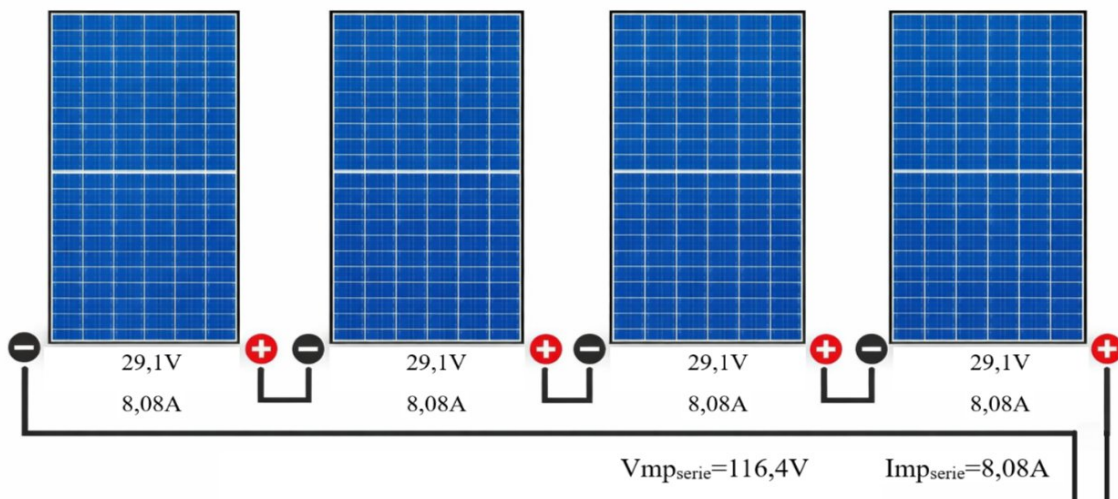


Figura 4.3: Conexión de los paneles solares en serie.

#### 4.3.1.2 Conexión en paralelo (4 paneles)

En la configuración en paralelo, el voltaje del sistema permanece igual al de un módulo individual, esta relación se establece mediante la Ecuación 6:

$$V_{mp_{paralelo}} = V_{mp}$$

Ecuación 6

$$V_{mp_{paralelo}} = 29,1V$$

La corriente total corresponde a la suma de las corrientes generadas por cada módulo, lo cual se expresa mediante la Ecuación 7:

$$I_{mp_{paralelo}} = 4 \times I_{mp}$$

Ecuación 7

$$Imp_{paralelo} = 4 \times 8,08A$$

$$Imp_{paralelo} = 32,32A$$

La potencia de la conexión en paralelo se obtiene como el producto del voltaje y la corriente y se determina mediante la Ecuación 8:

$$Pmp_{paralelo} = Vmp_{paralelo} \times Imp_{paralelo}$$

Ecuación 8

$$Pmp_{paralelo} = 29,1V \times 32,32A$$

$$Pmp_{paralelo} = 940,5W \approx 940W$$

El voltaje en circuito abierto del sistema en paralelo se mantiene igual al de un solo módulo, como se expresa en la Ecuación 9:

$$Voc_{paralelo} = Voc$$

Ecuación 9

$$Voc_{paralelo} = 37,4V$$

La corriente de cortocircuito corresponde a la suma de las corrientes de cada módulo, y se determina con la Ecuación 10:

$$Isc_{paralelo} = 4I_{sc}$$

Ecuación 10

$$Isc_{paralelo} = 4 \times 8,66A = 34,64A$$

En paralelo se incrementa la corriente del arreglo lo cual beneficia aplicaciones que requieren mayor capacidad de corriente mientras el voltaje se mantiene igual al de un módulo, como se ilustra en la Figura 4.4. Para el sistema de medición, esta configuración exige que el transmisor de corriente soporte al menos  $Isc_{paralelo} = 34,64A$

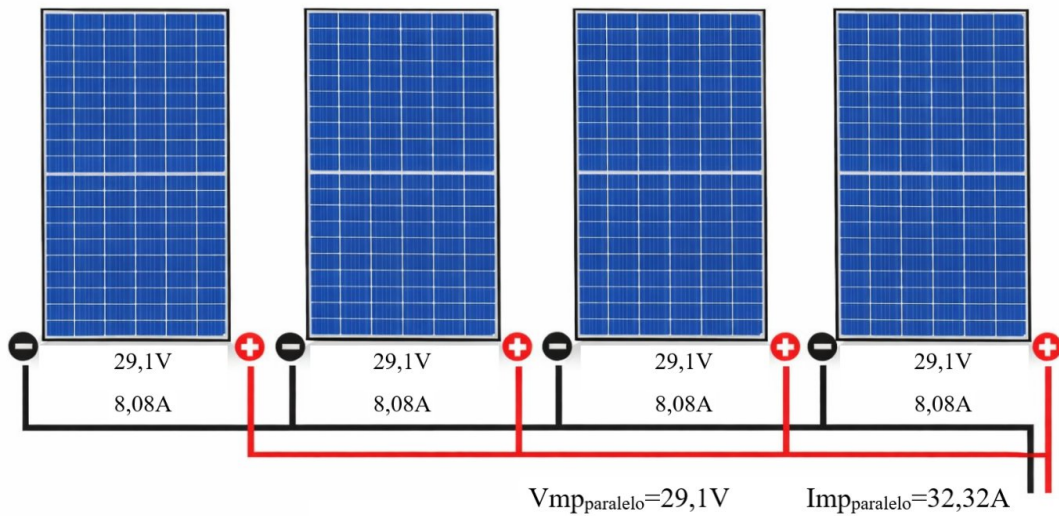


Figura 4.4: Conexión de los paneles solares en paralelo.

### 4.3.2 Dimensionamiento del sistema de medición

Generalmente, los sensores de voltaje poseen una entrada estándar de 0–250 VDC con una señal de salida de 0–5 VDC, mientras que los sensores de corriente presentan un rango de entrada de 0–50 A DC y una salida igualmente proporcional de 0–5 VDC. En la Figura 4.5 se muestran los datos de placa de los transmisores de voltaje (JXDC) y corriente (JXK-10), donde se verifican estos rangos nominales de operación, para establecer los requerimientos eléctricos del sistema.



Figura 4.5: Especificaciones técnicas de los transmisores de voltaje y corriente.

Para verificar que los sensores seleccionados sean adecuados para el sistema, se comparan los valores máximos del arreglo fotovoltaico con los rangos nominales de los transmisores. Para el transmisor de voltaje se utiliza la Ecuación 11 y para el transmisor de corriente se emplea la Ecuación 12:

$$V_{oc\,serie} \leq V_{maxT}$$

$$149,6 \leq 250$$

$$I_{sc\text{ paralelo}} \leq I_{maxT}$$

$$34,64 \leq 50$$

### 4.3.3 Modelo lineal de conversión de los transmisores a magnitud física

Los transmisores industriales utilizados en sistemas fotovoltaicos operan bajo un principio de conversión lineal, donde la señal analógica de salida es directamente proporcional a la magnitud física medida. Esta característica permite representar su comportamiento mediante un modelo de proporcionalidad directa. En la Figura 4.6 se ilustran las etapas del proceso de adquisición de señal, que comprenden: el acondicionamiento realizado por el transmisor (0–5 VDC), la digitalización mediante el convertidor analógico–digital (ADC) y el posterior procesamiento en software para la obtención de la magnitud física real.

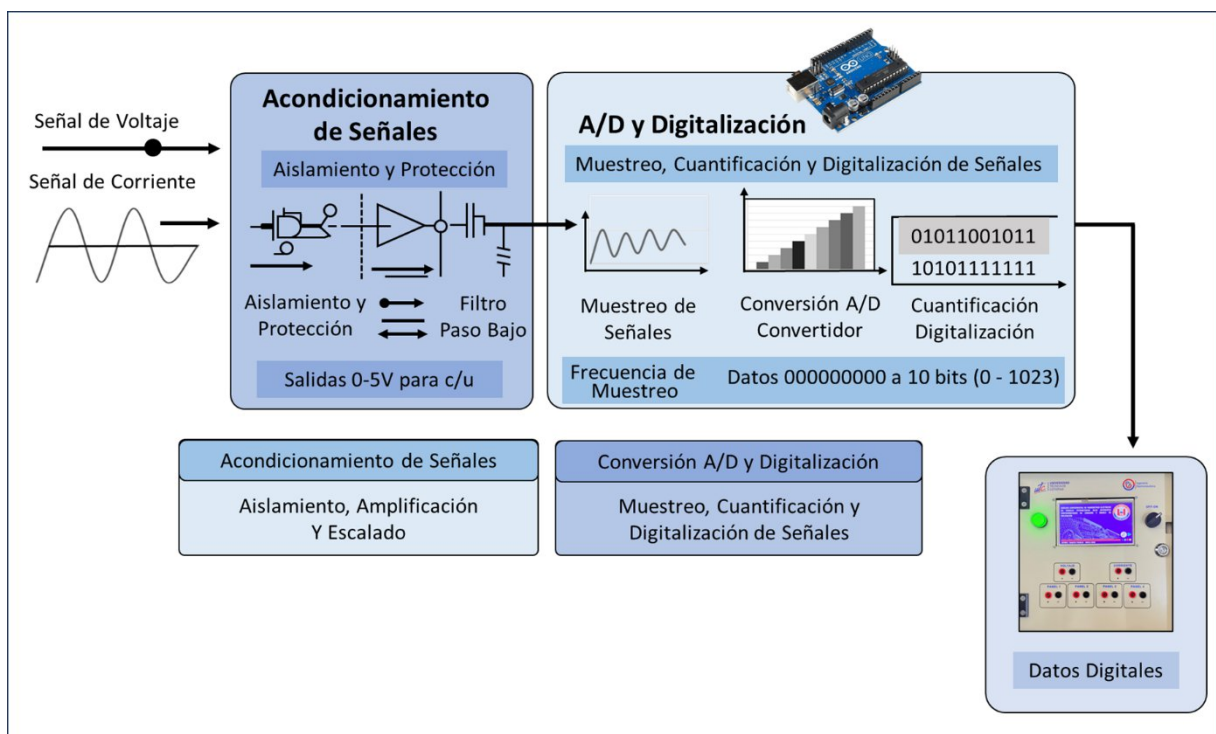


Figura 4.6: Etapas de conversión de señal analógica a magnitud física.

Considerando que la relación entre la señal de salida y la magnitud física es lineal, para la señal de voltaje se puede utilizar la Ecuación 13:

$$V_{pv} = \left( \frac{V_{maxT}}{5} \right) \times V_{outV}$$

Ecuación 13

Dónde:

$V_{pv}$  es el voltaje real del arreglo medido [V]

$V_{maxT}$  es el rango máximo del transmisor de voltaje [V]

$V_{outV}$  es la señal de salida del transmisor de voltaje [V]

Sustituyendo el  $V_{maxT}$

$$V_{pv} = \left( \frac{250}{5} \right) \times V_{outV}$$

$$V_{pv} = 50 \times V_{outV}$$

Para la corriente se determina la conversión mediante la ecuación 14:

$$I_{pv} = \left( \frac{I_{maxT}}{5} \right) \times V_{outI}$$

Ecuación 14

Dónde:

$I_{pv}$  es la corriente real del arreglo medido [A]

$I_{maxT}$  es el rango máximo del transmisor de corriente [A]

$V_{outI}$  es la señal de salida del transmisor de corriente [V]

Sustituyendo el  $I_{maxT}$

$$I_{pv} = \left( \frac{50}{5} \right) \times V_{outI}$$

$$I_{pv} = 10 \times V_{outI}$$

#### 4.3.4 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL MECANISMO

El actuador lineal convierte el desplazamiento axial en una variación del ángulo de inclinación de los paneles solares, esta relación se determina a partir de la geometría del mecanismo

modelado como un sistema plano y articulado definido por los puntos A, O y B, tal como se muestra en la Figura 4.7. En esta configuración, O representa el eje de giro del panel, A el punto de anclaje fijo del actuador y B la unión móvil con la estructura inclinable; dado que el mecanismo posee un único grado de libertad dominante, el vínculo entre la longitud del actuador y el ángulo  $\theta$  puede establecerse mediante trigonometría, aplicando la ley de cosenos, lo que permite describir matemáticamente el comportamiento cinemático del sistema.

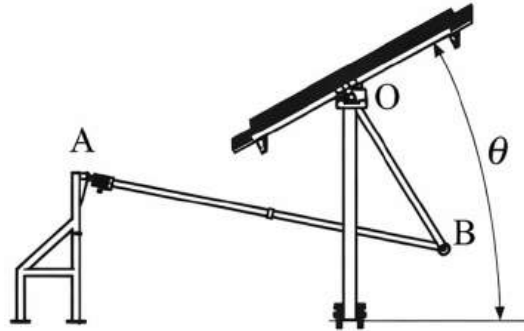


Figura 4.7: Representación del mecanismo plano A–O–B para el modelamiento trigonométrico.

Dónde:

O es el eje de giro del conjunto portapaneles.

A es el anclaje fijo del actuador sobre la base.

B es el anclaje móvil del vástago sobre el brazo solidario a la estructura inclinable.

El actuador define el segmento de longitud variable:

$$s = AB$$

y el ángulo de inclinación del panel se define como  $\theta$  respecto al plano horizontal.

Las distancias geométricas constantes del sistema se definen como:

$$a = |OA|$$

$$b = |OB|$$

El ángulo  $\varphi(\theta)$  se forma mediante los vectores  $\overrightarrow{OA}$  y  $\overrightarrow{OB}$ . La ley de cosenos establece:

$$s(\theta)^2 = a^2 + b^2 - 2ab \times \cos(\varphi(\theta))$$

Para expresar  $\varphi$  en función de  $\theta$ , se define  $\alpha$  como el ángulo fijo del vector  $\overrightarrow{OA}$  respecto al eje horizontal. Como  $\overrightarrow{OB}$  rota junto al panel, su orientación se vincula a  $\theta$ . En ese caso:

$$\varphi(\theta) = \theta + \alpha$$

La relación entre la longitud del actuador y el ángulo de inclinación del panel se determina mediante la Ecuación 15:

$$s(\theta) = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \times a \times b \times \cos(\theta + \alpha)}$$

Ecuación 15

Esta expresión describe la relación no lineal entre la longitud del actuador y el ángulo de inclinación del panel, de esta forma se puede calcular cuánto debe extenderse o retraerse el actuador para alcanzar un ángulo  $\theta$ , necesario para control por Arduino.

#### 4.3.4.1 Sensibilidad del mecanismo y obtención del modelo lineal

Dado que la relación  $s(\theta)$  es no lineal, la sensibilidad del mecanismo varía en función del ángulo. Para determinar cuántos milímetros corresponden a una variación angular, se analiza la derivada del modelo respecto a  $\theta$ :

$$\left(\frac{ds}{d\theta}\right)_{mm/^\circ} = \left(\frac{ds}{d\theta}\right)_{mm/rad} \times \frac{\pi}{180}$$

Esta expresión permite estimar el desplazamiento requerido para un incremento pequeño de ángulo alrededor de una posición de trabajo determinada. Para simplificar la implementación del control, se adopta una aproximación lineal basada en las posiciones extremas del mecanismo.

Cuando el vástago del actuador se encuentra completamente retraído, el panel alcanza su ángulo mínimo de inclinación, condición mostrada en la Figura 4.8, donde la longitud del actuador es:

$$s_{ret} = 1237mm$$

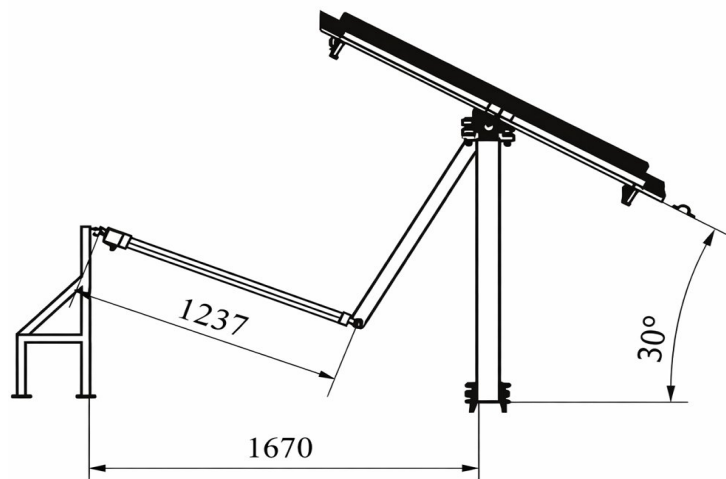


Figura 4.8: Posición del mecanismo con el vástago del actuador retraído.

Por otro lado, cuando el actuador se encuentra completamente extendido, el panel alcanza su ángulo máximo de inclinación, tal como se observa en la Figura 4.9, donde la longitud del actuador es:

$$s_{ext} = 2232 \text{ mm}$$

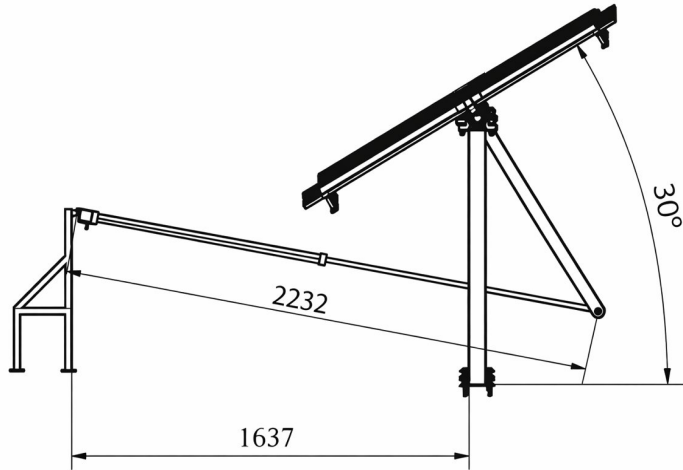


Figura 4.9: Posición del mecanismo con el vástago del actuador extendido.

Mediante una interpolación lineal entre extremos, la pendiente del modelo se obtiene con la ecuación 16:

$$m = \frac{ds}{d\theta}$$

$$m = \frac{s_{ext} - s_{ret}}{\theta_{ext} - \theta_{ret}}$$

Ecuación 16

Dónde:

$\theta_{ext}$  ángulo del panel respecto a la horizontal en extensión total.

$\theta_{ret}$  ángulo del panel respecto a la horizontal en retracción total.

$$m = \frac{2232 - 1237}{30 - (-30)}$$

$$m = 16,589 \frac{mm}{\circ}$$

$$\frac{ds}{d\theta} = 16,589 \frac{mm}{\circ}$$

El modelo lineal del sistema se expresa mediante la Ecuación 17:

$$s(\theta) = m \times \theta + b$$

Ecuación 17

Despejando el intercepto del modelo se obtiene la Ecuación 18:

$$b = s_{ext} - m \times \theta_{ext}$$

Ecuación 18

$$b = (2232 - (16,589)(30))mm$$

$$b = 1734,51mm$$

Por tanto:

$$s(\theta) = 16,589 \times \theta + 1734,51$$

Para conocer cuántos milímetros debe desplazarse el actuador cuando el panel cambia un ángulo se evalúa la diferencia entre dos posiciones empleando la Ecuación 19:

$$\Delta_s = s(\theta_{ext}) - s(\theta_{ret})$$

Ecuación 19

$$\Delta_s = (16,589\theta_2 + 1734,51) - (16,589\theta_1 + 1734,51)$$

$$\Delta_s = 16,589(\theta_2 - \theta_1)$$

$$\Delta_s = 16,589\Delta\theta$$

Dónde:

$\Delta\theta$  es el cambio angular del panel en grados.

Finalmente, para conocer el desplazamiento correspondiente a una variación angular de un grado, se aplica la Ecuación 20:

Si  $\Delta\theta = 1^\circ$

$$\Delta_{s,1^\circ} = 16,589(1^\circ)$$

Ecuación 20

$$\Delta_{s,1^\circ} = 16,589mm$$

## 4.4 SELECCIÓN DE MATERIALES




La selección de componentes se realizó bajo criterios de compatibilidad eléctrica, capacidad de corriente, robustez, disponibilidad y facilidad de integración.

### 4.4.1 Pantalla HMI Nextion NX8048T070\_011

Se evaluó tres opciones de pantallas para la interfaz hombre-máquina del seguidor solar: una pantalla LCD básica sin interfaz gráfica avanzada, una pantalla TFT convencional y una

pantalla HMI con procesador integrado como se observa en la Tabla 4.1. El objetivo fue comparar capacidad de visualización, facilidad de programación, interacción con el usuario y adecuación para aplicaciones de monitoreo y control en sistemas solares.

Tabla 4.1: Selección de la pantalla HMI.

<b>Características</b>	<b>LCD 20x4</b>	<b>TFT 7"</b>	<b>Nextion NX8048T070_011</b>
			
<b>Tipo de pantalla</b>	LCD alfanumérica	TFT a color	TFT a color con HMI
<b>Tamaño</b>	20×4 caracteres	7 pulgadas	7 pulgadas
<b>Resolución</b>	—	800×480 px	800×480 px
<b>Interfaz</b>	Paralela	SPI / Paralela	Serial (UART)
<b>Capacidad gráfica</b>	Muy limitada	Alta	Alta
<b>Función táctil</b>	No	Opcional	Sí
<b>Procesador integrado</b>	No	No	Sí
<b>Carga sobre microcontrolador</b>	Alta	Alta	Baja
<b>Facilidad de programación</b>	Alta	Media	Alta




*Fuente: Los autores*

Como se observa la hoja de datos presentada en el Anexo B la pantalla Nextion NX8048T070\_011 fue la opción más adecuada para el seguidor solar, ya que integra un sistema HMI que simplifica el desarrollo de la interfaz gráfica y reduce el uso de recursos del microcontrolador. Permite una visualización clara y amigable de parámetros como posición del seguidor, estado del sistema y modos de operación. Frente a las pantallas LCD convencionales, ofrece mayor capacidad gráfica e interacción; y comparada con pantallas TFT genéricas, reduce la complejidad del software y mejora la fiabilidad del sistema, manteniendo una adecuada relación costo–beneficio para aplicaciones académicas y experimentales.

#### 4.4.2 Controlador Arduino Uno

En la Tabla 4.2 se analizó tres opciones de microcontroladores ampliamente utilizados en sistemas de control y automatización: un microcontrolador básico de 8 bits, una plataforma de mayor capacidad y una placa de desarrollo de uso extendido en aplicaciones académicas e industriales. El análisis se enfocó en capacidad de procesamiento, número de entradas y salidas, facilidad de programación, compatibilidad con periféricos y disponibilidad.

Tabla 4.2: Selección del controlador.

Características	Arduino Uno 	Arduino Mega 2560 	ESP32 
<b>Microcontrolador</b>	ATmega328P	ATmega2560	Xtensa dual-core
<b>Frecuencia de reloj</b>	16 MHz	16 MHz	hasta 240 MHz
<b>Entradas digitales</b>	14	54	34
<b>Salidas PWM</b>	6	15	16
<b>Entradas analógicas</b>	6	16	18
<b>Memoria Flash</b>	32 kB	256 kB	4 MB
<b>SRAM</b>	2 kB	8 kB	520 kB
<b>Voltaje de operación</b>	5 V	5 V	3.3 V
<b>Comunicación</b>	UART, I <sup>2</sup> C, SPI	UART, I <sup>2</sup> C, SPI	UART, I <sup>2</sup> C, SPI, WiFi, Bluetooth
<b>Facilidad de programación</b>	Muy alta	Alta	Media
<b>Consumo energético</b>	Bajo	Medio	Bajo

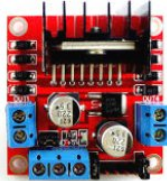


Fuente: Los autores

El Arduino Uno fue seleccionado como controlador del seguidor solar debido a su equilibrio entre simplicidad, confiabilidad y disponibilidad, sus características se describen a detalle en el Anexo C. Ofrece suficientes entradas y salidas para la lectura de sensores y el control del driver de motor, además de una programación sencilla y ampliamente documentada, lo que facilita la implementación y depuración del sistema.

#### 4.4.3 Driver del motor BTS7960

Se analizaron mediante la Tabla 4.3 tres módulos drivers para el accionamiento del motor del seguidor solar: un driver económico de uso común, un driver de gama media con mayores protecciones y un módulo de alta corriente para aplicaciones de mayor exigencia. El análisis se centró en capacidad de corriente, eficiencia, protecciones y adecuación para operación continua en exteriores.

Tabla 4.3: Selección del driver del motor.

Características	L298N	VNH2SP30	IBT-2 (BTS7960)
			
<b>Tipo de driver</b>	Puente H bipolar	Puente H MOSFET	Puente H MOSFET
<b>Corriente máx. continua</b>	~2 A	~14 A	hasta 43 A
<b>Tensión de operación</b>	5–35 V	5.5–16 V	6–27 V
<b>Eficiencia</b>	Baja	Media	Alta
<b>Caída de tensión</b>	Alta	Media	Baja
<b>Protección térmica</b>	Limitada	Sí	Sí
<b>Protección sobrecorriente</b>	No	Sí	Sí
<b>Control PWM</b>	Sí	Sí	Sí
<b>Robustez</b>	Básica	Media	Alta




Fuente: Los autores

El módulo IBT-2 basado en el driver BTS7960 resultó el más adecuado para el seguidor solar debido a su alta capacidad de manejo de corriente y su elevada eficiencia, lo que permite accionar motores DC sometidos a cargas variables y operación prolongada. En comparación con el L298N, presenta menores pérdidas y mayor fiabilidad; frente al VNH2SP30, ofrece una mayor capacidad de corriente y mejor desempeño en aplicaciones mecánicas exigentes. Estas características se describen en el Anexo D y lo convirtió en una solución robusta y segura para sistemas de seguimiento solar.

#### 4.4.4 Sensor de corriente JXDD y el sensor de voltaje JXDC

Para la medición de las variables eléctricas del sistema fotovoltaico del seguidor solar se evaluó tres alternativas de sensado descritas a detalle en la Tabla 4.4: sensores simples de corriente, módulos integrados de medición digital y un sistema modular industrial de medición analógica de corriente y voltaje. El análisis se centró en precisión, rango de medición, aislamiento eléctrico, compatibilidad con el controlador y robustez para aplicaciones energéticas.

Tabla 4.4: Sensor de corriente y voltaje

Características	ACS712	INA219	Sensor JXDD + JXDC
			
Variables medidas	Corriente	Corriente y voltaje	Corriente y voltaje
Tipo de salida	Analógica	Digital (I <sup>2</sup> C)	Analógica
Rango de corriente	±30 A (máx.)	hasta 3.2 A	hasta 50 A
Rango de voltaje	—	hasta 26 V	hasta 250 V
Aislamiento eléctrico	Parcial	No	Sí
Precisión	Media	Alta	Alta
Uso industrial	No	No	Sí
Compatibilidad con Arduino	Alta	Media	Alta
Robustez mecánica	Baja	Baja	Alta
Aplicación recomendada	Proyectos básicos	Electrónica de baja potencia	Sistemas de potencia y energía

Fuente: Los autores




El sistema de medición compuesto por el sensor de corriente JXDD y el sensor de voltaje JXDC fue seleccionado por ofrecer un rango de medición adecuado para sistemas fotovoltaicos,

además de aislamiento eléctrico entre el circuito de potencia y el sistema de control, lo cual incrementa la seguridad y confiabilidad del equipo. A diferencia de sensores como el ACS712 o el INA219, esta solución permite medir simultáneamente corrientes elevadas y tensiones de hasta 250 V, características necesarias para el monitoreo del desempeño eléctrico del seguidor solar. En el Anexo E se observa que sus salidas analógicas facilitan la integración con el controlador Arduino y su diseño robusto lo hace apropiado para aplicaciones experimentales y de campo.

#### 4.4.5 Fuente SPB-A120-12

Para el suministro eléctrico del sistema de control y accionamiento del seguidor solar se analizó tres alternativas de fuentes de alimentación de 12 VDC: una fuente conmutada genérica, una fuente industrial de gama media y una fuente industrial certificada de uso continuo. El análisis se enfocó en capacidad de corriente, estabilidad de voltaje, protecciones, confiabilidad y adecuación para aplicaciones de automatización, como se observa en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Selección de la fuente de voltaje.

<b>Características</b>	<b>Fuente genérica</b>	<b>Mean Well LRS</b>	<b>Autonics SPB-A120-12</b>
			
<b>Tipo de fuente</b>	Conmutada básica	Conmutada industrial	Conmutada industrial
<b>Voltaje de salida</b>	12 VDC	12 VDC	12 VDC
<b>Corriente nominal</b>	10 A	10 A	10 A
<b>Potencia</b>	120 W	120 W	120 W
<b>Rango de entrada</b>	110–220 VAC	100–240 VAC	100–240 VAC / DC
<b>Regulación de voltaje</b>	Básica	Buena	Alta
<b>Ajuste de voltaje</b>	No	Sí	Sí (V.Adjust)
<b>Indicadores LED</b>	No	Sí	Sí (DC OK / DC Low)
<b>Protecciones eléctricas</b>	Limitadas	Sobrecarga, corto	Sobrecarga, corto, sobrevoltaje
<b>Uso industrial</b>	No	Sí	Sí

<b>Robustez mecánica</b>	Media	Alta	Muy alta
--------------------------	-------	------	----------




*Fuente: Los autores*

La fuente de alimentación Autonics SPB-A120-12 fue seleccionada debido a su alta estabilidad de salida, diseño industrial y múltiples protecciones integradas, lo que garantiza un suministro confiable para el controlador, sensores y módulos de potencia del seguidor solar. Con base a sus características descritas en el Anexo F, esta fuente en comparación de otras genéricas, ofrece mayor seguridad y regulación de voltaje, reduciendo el riesgo de fallas por fluctuaciones eléctricas.

#### 4.4.6 Gabinete eléctrico

Para la protección, organización e integración de los componentes eléctricos y electrónicos del sistema de seguimiento solar, se evaluó tres alternativas que se describen en la Tabla 4.6, considerando criterios como grado de protección, resistencia mecánica, facilidad de montaje, capacidad interna y adecuación para aplicaciones de automatización industrial.

Tabla 4.6: Selección de gabinete eléctrico.

<b>Características</b>	<b>Gabinete metálico básica</b>	<b>Tablero plástico IP65</b>	<b>Gabinete metálico doble fondo</b>
			
<b>Material</b>	Acero pintado	Polímero ABS	Acero laminado
<b>Grado de protección</b>	IP54	IP65	IP65
<b>Doble fondo</b>	No	No	Sí
<b>Resistencia mecánica</b>	Media	Media	Alta
<b>Protección contra polvo</b>	Parcial	Total	Total
<b>Protección contra humedad</b>	Parcial	Alta	Alta
<b>Capacidad de montaje interno</b>	Limitada	Media	Amplia
<b>Uso industrial</b>	Bajo	Medio	Alto
<b>Adecuado para automatización</b>	Limitado	Aceptable	Óptimo

<b>Seguridad eléctrica</b>	Media	Media	Alta
----------------------------	-------	-------	------




*Fuente: Los autores*

El gabinete de control metálico de doble fondo a diferencia del tablero plástico y del modelo metálico básico ofrece mayor resistencia mecánica y un grado de protección IP65. Su diseño de doble fondo que se ilustra en el Anexo G, permite montar los componentes eléctricos de manera independiente, facilitando el ordenamiento del cableado, la instalación de rieles DIN y la correcta fijación de equipos sin comprometer la estructura externa por estas razones se seleccionó este tipo de gabinete.

#### 4.4.7 Encoder BRT38-S06G

Para la realimentación de posición del mecanismo se evaluó tres alternativas de encoders rotativos incrementales en la Tabla 4.7, analizando criterios de resolución, robustez, facilidad de montaje, compatibilidad eléctrica con el controlador y confiabilidad. El objetivo fue seleccionar un elemento que permita registrar el giro del eje de manera repetible y estable, aportando precisión al control del posicionamiento deseada.

Tabla 4.7: Selección de encoder.

<b>Características</b>	<b>Encoder básico</b>	<b>Encoder óptico (tipo KY-040)</b>	<b>Encoder BRT38-S06G</b>
			
<b>Tipo</b>	Incremental básico	Incremental óptico	Incremental industrial
<b>Montaje</b>	Manual / artesanal	Fácil (módulo)	Eje sólido
<b>Resolución</b>	Baja–media	Media	Media–alta (según ficha técnica)
<b>Señales de salida</b>	A/B (variable)	A/B	A/B (cuadratura) + común
<b>Compatibilidad con Arduino</b>	Media	Alta	Alta (acondicionamiento adecuado)
<b>Inmunidad al ruido</b>	Baja	Media	Alta
<b>Robustez mecánica</b>	Baja	Baja–media	Alta

<b>Uso recomendado</b>	Pruebas simples	Prototipos básicos	Automatización / medición confiable
<b>Operación continua</b>	Baja	Media	Alta

*Fuente: Los autores*

Se seleccionó el Encoder Rotativo Incremental Industrial de eje sólido, modelo BRT38-S06G, debido a su robustez mecánica y estabilidad en la señal frente a vibraciones y ruido eléctrico, condiciones comunes en sistemas electromecánicos. Analizando las especificaciones técnicas del encoder descritas en el Anexo H, esta opción ofrece un montaje firme en el eje, mejor repetibilidad de lectura y mayor confiabilidad en operación continua, lo cual mejora el desempeño del control de posicionamiento del prototipo y reduce errores durante el registro de datos.

#### **4.5 DESARROLLO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO**

Esta sección documenta el diseño e implementación del sistema electrónico de adquisición y control, así como su integración física en un gabinete eléctrico destinado a pruebas experimentales con paneles fotovoltaicos. Se presentan los diagramas de circuito desarrollados en Proteus, el diseño de la PCB, la vista 3D del ensamblaje electrónico y la evidencia del montaje real en gabinete, incluyendo el panel frontal con interfaz HMI y puntos de conexión para medición y configuración.

##### **4.5.1 Esquemático eléctrico**

El diseño del circuito electrónico fue desarrollado en el entorno de simulación Proteus con el propósito de garantizar una integración ordenada y funcional entre los subsistemas de alimentación, control, adquisición de datos y comunicación con la interfaz de usuario. Para facilitar el análisis y la validación del sistema, el esquemático fue organizado por etapas, permitiendo identificar claramente la función de cada bloque dentro del prototipo experimental.

##### **4.5.1.1 Etapa de alimentación y regulación**

La etapa de alimentación y regulación se encarga de acondicionar la tensión proveniente de la fuente principal y suministrar una salida estable de 5 VDC para el sistema de control. Como se muestra en la Figura 4.1, la energía ingresa por la bornera de alimentación principal y pasa por un bloque de filtrado y rectificación que reduce perturbaciones y protege frente a inversión de polaridad. Posteriormente, un convertidor DC-DC tipo step-down disminuye el nivel de tensión a un valor adecuado para electrónica de bajo voltaje. Finalmente, un regulador lineal con

capacitores de desacople estabiliza la señal, garantizando una alimentación limpia y constante para el microcontrolador y los módulos electrónicos como se ilustra en la Figura 4.10.

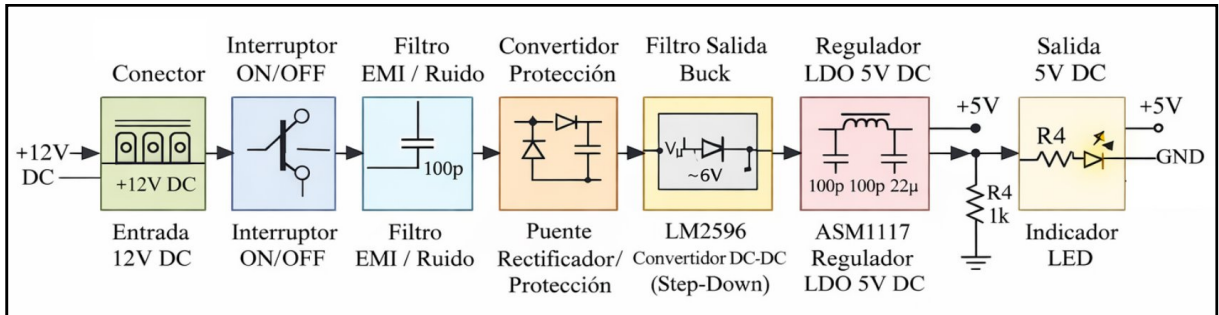


Figura 4.10: Etapa de alimentación y regulación electrónica.

#### 4.5.1.2 Etapa de control y comunicación

En la Figura 4.11 se presenta la etapa de control y comunicación que coordina el funcionamiento general del seguidor solar, realizando la lectura de variables analógicas como voltaje y corriente, así como la generación de señales de control hacia el actuador lineal mediante salidas digitales y modulación PWM.

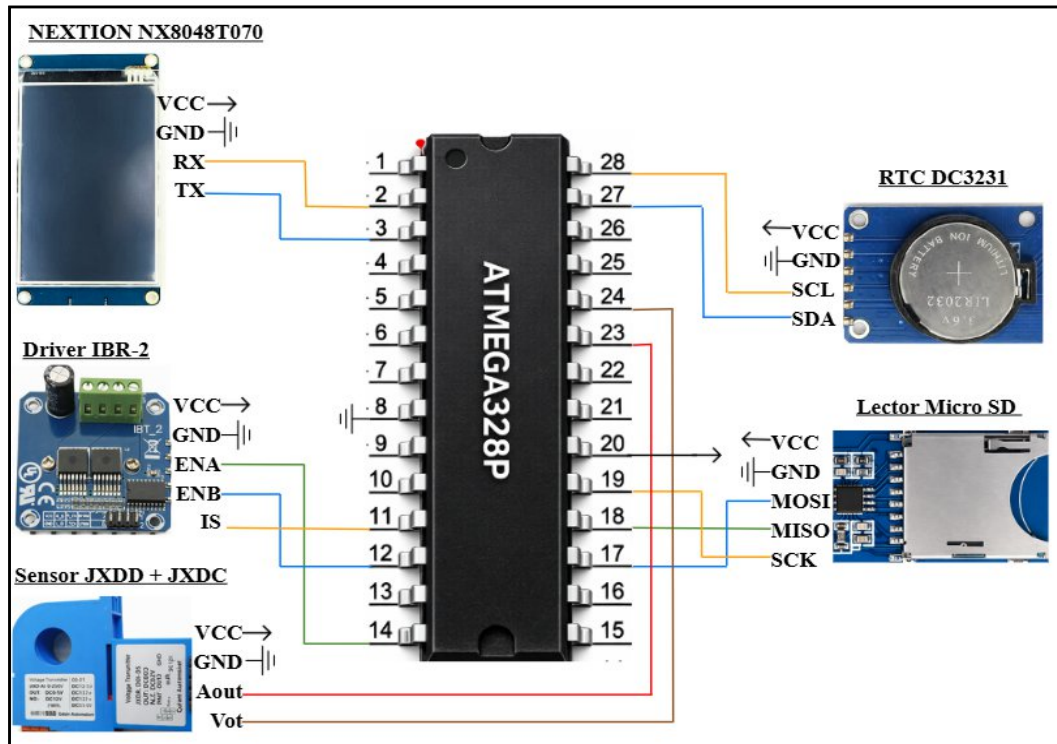


Figura 4.11: Etapa de adquisición, control y comunicación.

La interconexión del microcontrolador ATmega328P con los diferentes módulos que conforman el sistema. La interfaz gráfica Nextion permite la visualización de información y la interacción con el usuario mediante comunicación serial. El módulo RTC DS3231, conectado

a través del protocolo I<sup>2</sup>C, proporciona la referencia de fecha y hora para el registro de datos. Asimismo, el lector de tarjeta MicroSD, comunicado mediante interfaz SPI, posibilita el almacenamiento de la información generada durante la operación del sistema. Por otra parte, el driver IBT-2 recibe las señales de control provenientes del microcontrolador para el accionamiento del actuador lineal, mientras que el sensor de voltaje y corriente suministra señales analógicas que permiten el monitoreo de las variables eléctricas del sistema.

#### **4.5.1.3 Etapa de bornes de censado y almacenamiento de datos**

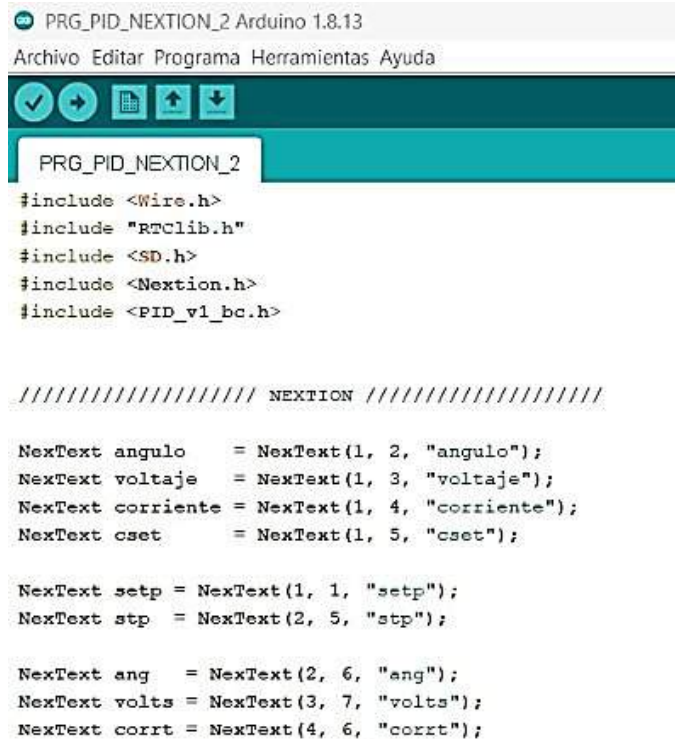
El sistema dispone de bornes de entrada específicos para sensado de voltaje y corriente. Estas entradas permiten recibir señales analógicas provenientes de transmisores industriales, las cuales son acondicionadas y enviadas al microcontrolador mediante el convertidor ADC interno. Esto garantiza que el sistema pueda medir magnitudes elevadas del arreglo fotovoltaico sin exponer directamente la electrónica de control a niveles peligrosos de tensión o corriente.

Se incorporó un módulo de almacenamiento mediante tarjeta MicroSD (MICRO1) que permite registrar mediciones de tensión, corriente y potencia en archivos digitales para su posterior análisis comparativo adicionalmente se integró un módulo RTC basado en DS3231 (RTC1), cuya función es proporcionar referencia temporal precisa para el registro de datos durante los ensayos.

#### **4.5.2 Desarrollo de la programación**

##### **Programación del ATmega328P**

El microcontrolador ATmega328P fue programado en el entorno Arduino IDE utilizando lenguaje C/C++, con el propósito de implementar el control del actuador lineal encargado de regular la inclinación del panel fotovoltaico. En la Figura 4.12 se presenta el entorno de desarrollo empleado para la elaboración del código, donde se observa la estructura general del programa, las librerías utilizadas y la implementación del algoritmo de control y el código de programación completo se adjunta en el Anexo I. El sistema fue diseñado para operar bajo dos estrategias que se complementan una de otra: lazo cerrado mediante controlador PID y lazo abierto para pruebas y calibración.



```
PRG_PID_NEXTION_2 Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PRG_PID_NEXTION_2
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
#include <SD.h>
#include <Nextion.h>
#include <PID_v1_bc.h>

///////////////////////////////// NEXTION ///////////////////////////////////

NexText angulo    = NexText(1, 2, "angulo");
NexText voltaje   = NexText(1, 3, "voltaje");
NexText corriente = NexText(1, 4, "corriente");
NexText cset      = NexText(1, 5, "cset");

NexText setp = NexText(1, 1, "setp");
NexText stp  = NexText(2, 5, "stp");

NexText ang    = NexText(2, 6, "ang");
NexText volts  = NexText(3, 7, "volts");
NexText corrt  = NexText(4, 6, "corrt");
```

Figura 4.12: Entorno de programación en Arduino IDE.

En el modo de lazo cerrado, el microcontrolador realiza la lectura continua del ángulo del panel, esta señal es convertida digitalmente por el ADC interno y escalada a grados para representar la posición angular real del sistema. El valor medido se compara con el ángulo de referencia (setpoint), generándose un error que es procesado por el controlador PID que fue implementado mediante la librería PID\_v1\_bc.h. Esta librería permitió establecer los parámetros proporcional, integral y derivativo, establecer el tiempo de muestreo configurado en este caso a 10 ms y limitar la señal de salida en  $-255$  a  $255$ , compatible con el control PWM del driver del motor. La señal resultante se envía a los pines 5 y 6 para ejecutar el sentido de giro del actuador. Se incorporó una banda de tolerancia de  $\pm 1^\circ$  para detener el movimiento cuando el error es mínimo, reduciendo oscilaciones y esfuerzos mecánicos. El funcionamiento general de este modo se representa en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.13.

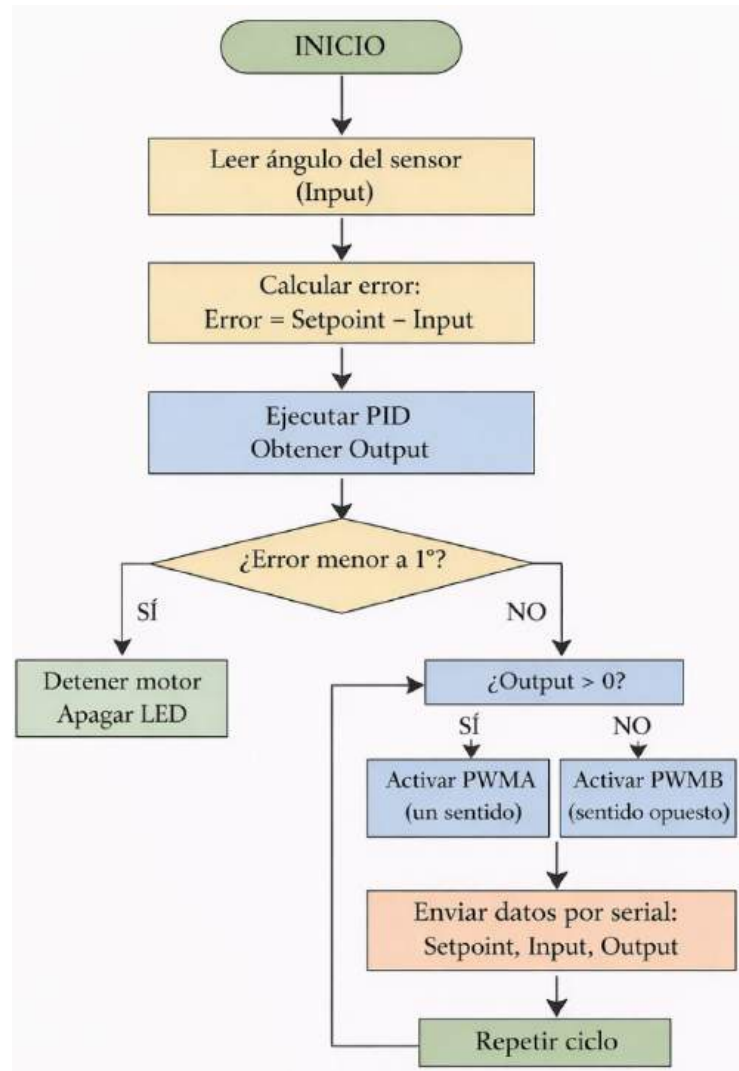


Figura 4.13: Diagrama de flujo para el modo de operación en lazo cerrado.

De manera complementaria, el sistema incorpora un modo de lazo abierto que permite aplicar directamente una señal PWM al actuador sin realizar comparación con un valor de referencia. Este modo se activa mediante comunicación serial desde un software externo, enviando un comando del tipo PWM, donde el porcentaje ingresado es convertido internamente a un valor de 0 a 255. En esta condición el actuador se mueve únicamente en función de la señal aplicada, mientras que el ángulo continúa siendo leído para fines de monitoreo y análisis. Este modo resulta útil para la caracterización del sistema, la obtención de curvas de respuesta y la sintonización experimental de los parámetros del controlador. Su funcionamiento se ilustra en la Figura 4.14.

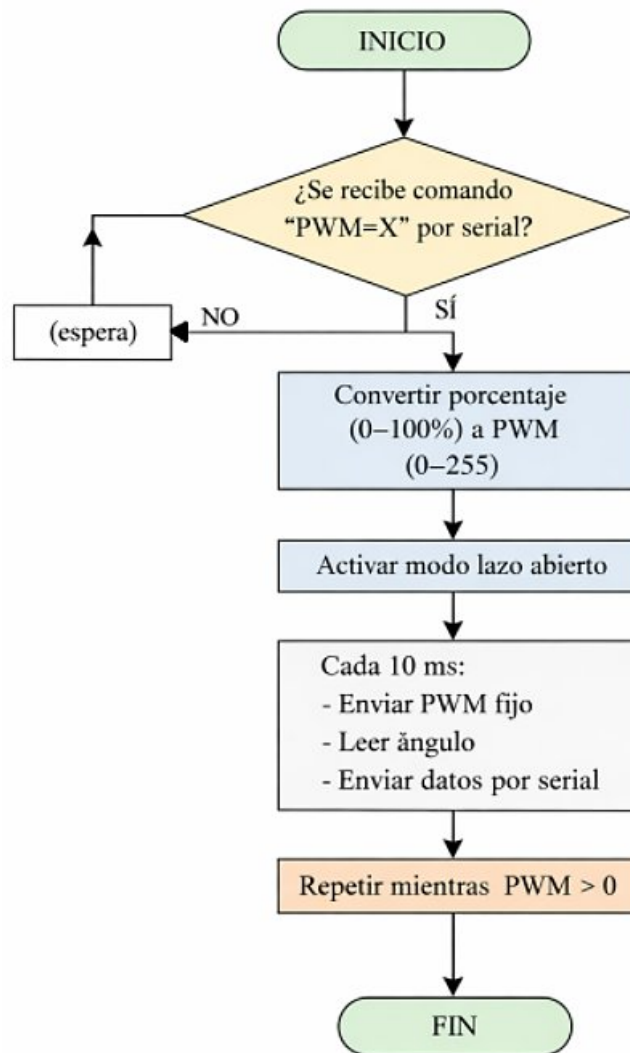


Figura 4.14: Diagrama de flujo para el modo de operación en lazo abierto.

Ambos modos operan de manera integrada dentro del mismo programa, permitiendo ejecutar pruebas en lazo abierto y control automático en lazo cerrado. Adicionalmente, el sistema transmite datos en formato CSV a la tarjeta micro SD para un análisis externo.

### Programación de la pantalla HMI Nextion

Para facilitar la interacción del usuario con el prototipo y permitir el monitoreo visual de las variables principales, se implementó una interfaz mediante una pantalla Nextion la que fue programada utilizando el código que se adjunta en el Anexo J, adicionalmente la interfaz fue diseñada en el software Nextion Editor y permitió visualizar en tiempo real el estado del sistema, ingresar valores de referencia para el posicionamiento, y navegar entre pantallas de medición y seguimiento, logrando una operación intuitiva.

En primer lugar, se desarrolló una pantalla de inicio que permite acceder a la interfaz principal mediante un botón de navegación, como se observa en la Figura 4.15 esta pantalla cumple una función informativa y de acceso.



Figura 4.15: Pantalla de inicio del sistema en la HMI Nextion.

Posteriormente, se implementó una pantalla de operación (Figura 4.16) donde el usuario puede ingresar valores de referencia (setpoints) y visualizar simultáneamente las variables eléctricas y la variable mecánica del sistema como: corriente, voltaje y ángulo actual.



Figura 4.16: Interfaz principal con setpoints ingresados y visualización activa.

Como complemento se incorporaron pantallas de monitoreo con gráfica, destinadas a representar tendencias de variables en el tiempo. La pantalla de ángulo permite observar el comportamiento del posicionamiento del sistema en función del tiempo y verificar estabilidad durante el movimiento del actuador, como se aprecia en la Figura 4.17. De manera muy similar, la pantalla de corriente (Figura 4.18) y el voltaje (Figura 4.19) que permitió monitorear su comportamiento durante la operación y detectar variaciones de carga o cambios en condiciones de ensayo.

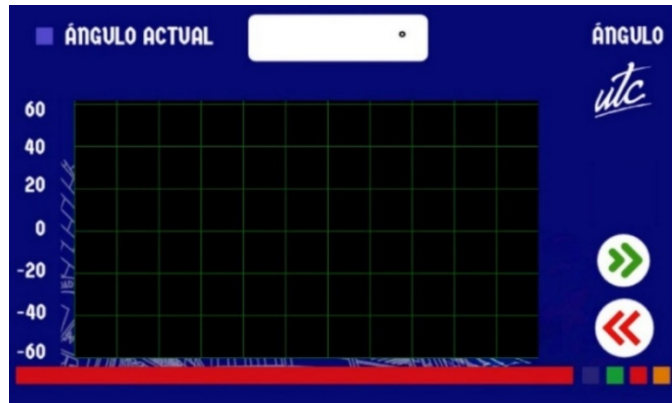


Figura 4.17: Pantalla de monitoreo gráfico del ángulo actual.

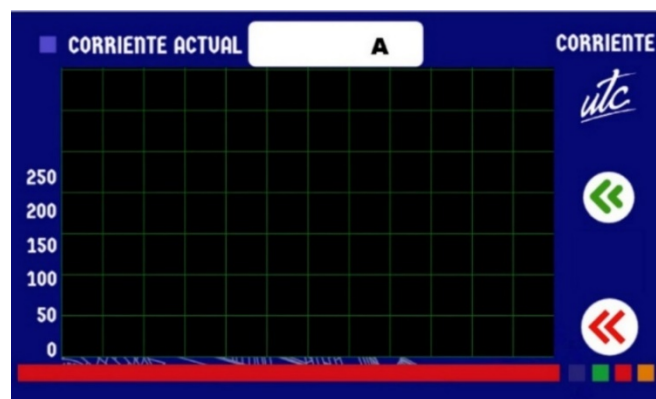


Figura 4.18: Pantalla de monitoreo gráfico de la corriente.

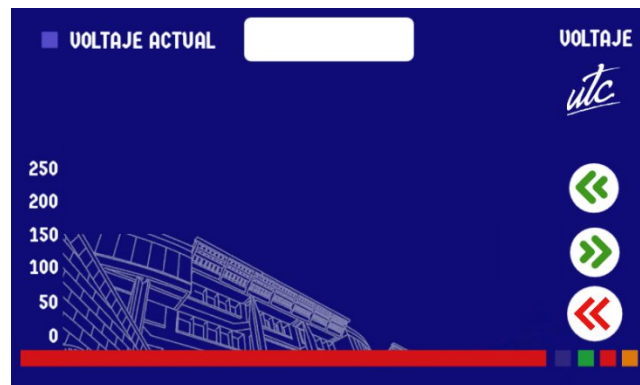


Figura 4.19: Pantalla de monitoreo gráfico del voltaje.

La comunicación entre la pantalla Nextion y el microcontrolador se realizó mediante comunicación serial UART, que permite enviar desde el controlador los valores medidos (corriente, voltaje y ángulo) para su visualización de forma inmediata, y recibir desde la HMI los comandos generados por el usuario.

### 4.5.3 Diseño del circuito impreso

Una vez realizado el esquemático, se procedió al diseño del circuito impreso, cuidando la separación funcional entre zonas de potencia, señales y conectores de campo. En la Figura 4.20 se aprecia el modelo 3D del circuito, donde se distinguen los componentes principales y las zonas reservadas para conectores superiores de censo y comunicación, además del espacio requerido por los módulos integrados, mientras que en la Figura 4.21 se presenta el diseño de pistas (trazado) y distribución de terminales.

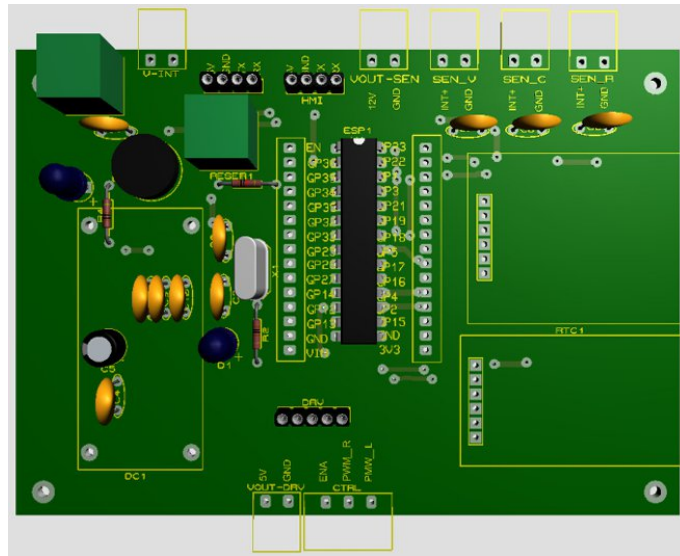


Figura 4.20: Modelo 3D del circuito electrónico.

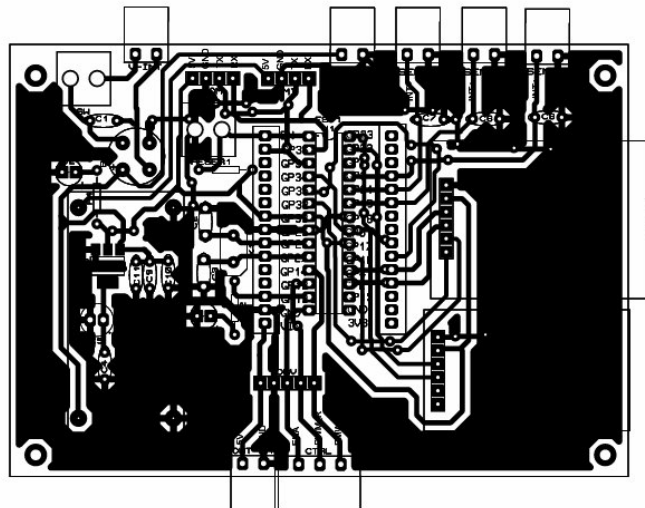


Figura 4.21: Circuito impreso.

#### **4.5.4 Diseño del tablero de control**

Con el propósito de garantizar orden, seguridad eléctrica y repetibilidad experimental, se diseñó una distribución interna basada en riel DIN y canaletas para el guiado organizado de los conductores. Esta disposición permite separar claramente los elementos de potencia, control y medición, facilitando el mantenimiento, reduciendo interferencias y minimizando cruces de cableado. En la Figura 4.22 se presenta la distribución interna del tablero de control, donde los componentes se organizan estratégicamente de la siguiente manera:

##### **1. Interruptor**

Se utilizó como elemento de maniobra manual para energizar o desenergizar el sistema de control permitiendo realizar el encendido y apagado seguro del tablero durante las pruebas experimentales.

##### **2. Termomagnético de protección general**

Se instaló con el propósito de proteger el sistema frente a sobrecorrientes y cortocircuitos. Este dispositivo interrumpe automáticamente el suministro eléctrico cuando se detectan condiciones anormales en el circuito.

##### **3. Porta fusibles o protección secundaria**

Se incorporó como una protección adicional para los circuitos internos del sistema ya que permiten proteger los componentes electrónicos sensibles ante posibles fallas o sobrecargas.

##### **4. Convertidor DC-DC tipo step-down**

El step-down se utilizó para reducir y regular el nivel de tensión proveniente de la fuente principal, permitiendo obtener un voltaje adecuado para alimentar los circuitos electrónicos.

##### **5. Atmega 328P**

Se implementó como microcontrolador principal del sistema, encargado de ejecutar el algoritmo de control, procesar las señales provenientes de los sensores y generar las señales de control hacia el actuador.

## **6. Lector Micro SD**

Tiene como finalidad almacenar los datos registrados durante los ensayos experimentales, tales como voltaje, corriente y ángulo de inclinación, permitiendo su posterior análisis.

## **7. Módulo RTC**

Se implementó con el objetivo de proporcionar referencia de fecha y hora al sistema, lo que permitió registrar temporalmente los datos obtenidos durante las pruebas experimentales.

## **8. Fuente de alimentación conmutada industrial**

Se instaló para suministrar energía eléctrica estable al sistema de control y a los dispositivos electrónicos del prototipo, garantizando un funcionamiento seguro y continuo.

## **9. Driver IBT-2 (BTS7960)**

Se empleó como módulo de potencia para el accionamiento del actuador lineal, este dispositivo permitió controlar el sentido de giro y la velocidad del motor mediante señales PWM provenientes del microcontrolador.

## **10. Sensores de medición de corriente y voltaje (transmisores JXDD / JXDC)**

Los sensores de voltaje y corriente se implementaron para medir las variables eléctricas permitiendo convertir estas magnitudes en señales analógicas compatibles con el microcontrolador para su procesamiento y monitoreo.

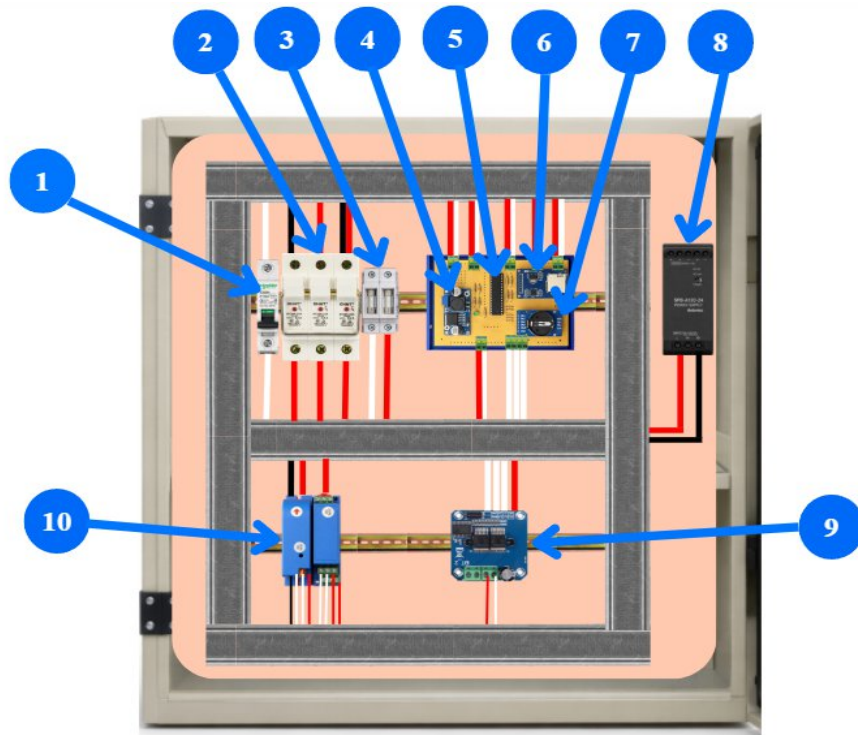


Figura 4.22: Diseño interno del tablero de control.

Para la interacción del usuario, se diseñó un panel frontal con interfaz HMI y puntos de conexión claramente rotulados. En la Figura 4.23 se presenta el diseño del panel frontal del sistema de monitoreo y control, se observa la pantalla HMI ubicada en la parte central, así como los elementos de control y conexión distribuidos de forma organizada:

### 1. Indicador luminoso

Se instaló como elemento de señalización visual para indicar el estado de energización del sistema. Cuando el indicador se enciende, permite confirmar que el sistema de control se encuentra alimentado y en funcionamiento.

### 2. Pantalla HMI

La pantalla Nextion se incorporó como interfaz principal de interacción entre el usuario y el sistema. A través de esta pantalla se visualizan variables como el voltaje, la corriente y el ángulo de inclinación del panel, además de permitir el ingreso de valores de referencia para el control del sistema.

### 3. Selector rotativo OFF-ON

Se utilizó como dispositivo de control para habilitar o deshabilitar la alimentación del sistema de monitoreo y control. Este selector permitió realizar el encendido o apagado del sistema de manera segura.

#### 4. Borneras de medición de corriente

Permiten la conexión de instrumentos de medición externos, como una pinza amperimétrica o un multímetro, con el fin de verificar y comparar los valores de corriente obtenidos por el sistema de monitoreo.

#### 5. Borneras de conexión de los paneles fotovoltaicos

Se implementaron como puntos de conexión para cada uno de los módulos fotovoltaicos, permitiendo realizar diferentes configuraciones de conexión, como serie, paralelo o mixto.

#### 6. Borneras de medición de voltaje

Se instalaron para facilitar la medición directa del voltaje mediante instrumentos externos, permitiendo validar los valores registrados por el sistema de monitoreo desarrollado.

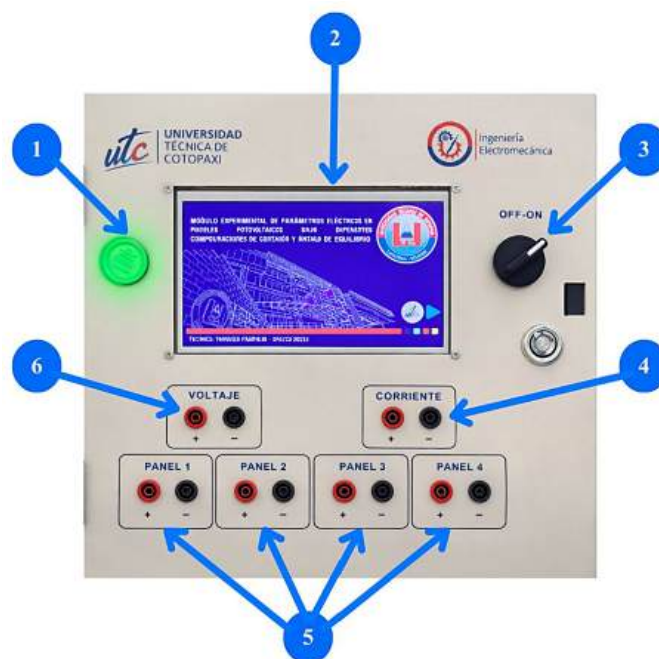


Figura 4.23: Diseño del panel frontal.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante la evaluación experimental del sistema fotovoltaico desarrollado. El análisis se centra en el comportamiento de los parámetros eléctricos de tensión, corriente y potencia bajo las configuraciones de en paralelo, serie y combinada.

En el desarrollo del análisis de resultados se registraron mediciones en el intervalo angular de operación del sistema ( $-30^\circ$  a  $+30^\circ$ ), realizando incrementos de  $1^\circ$ , lo que permitió obtener 61 posiciones. Este procedimiento permitió generar un conjunto de datos suficientemente amplio para analizar la influencia de la inclinación del panel en el desempeño energético del sistema. Las pruebas experimentales se realizaron el 23 de febrero de 2026 a las 12:30, bajo condiciones de radiación solar directa y estabilidad atmosférica, tratando de minimizar la influencia de variaciones ambientales durante el proceso de medición y garantizar la consistencia de los datos obtenidos.

Para la adquisición de datos se utilizaron cuatro elementos principales: el sistema de monitoreo desarrollado en el presente proyecto, un multímetro digital Fluke modelo 117 True RMS (Figura 5.1), una pinza amperimétrica Fluke modelo 376 FC True RMS Clamp Meter (Figura 5.2) y un medidor de inclinación e irradiancia Fluke FLK-IRR1-SOL (Figura 5.3). equipos de referencia de medida (equipos de la Universidad Técnica de Cotopaxi) para la medición de tensión, corriente y ángulo de inclinación respectivamente.



Figura 5.1: Multímetro digital Fluke modelo 117 True RMS.



Figura 5.2: Pinza amperimétrica Fluke modelo 376 FC True RMS Clamp Meter.



Figura 5.3: Medidor de inclinación solar Fluke FLK-IRR1-SOL.

En cada posición angular evaluada se registraron:

- Ángulo de los paneles
- Tensión eléctrica (V).
- Corriente eléctrica (A).
- Radiación solar incidente ( $W/m^2$ ).
- Temperatura.

Con el fin de determinar el desempeño energético del sistema en cada posición angular, se procedió al cálculo de la potencia eléctrica generada utilizando los valores de tensión y corriente

medidos por el multímetro digital de precisión marca Fluke, considerado como referencia de medida.

La potencia eléctrica instantánea fue calculada mediante la expresión fundamental:

$$P = V \times I$$

donde:

$P$  representa la potencia en watts (W),

$V$  corresponde a la tensión en volts (V),

$I$  corresponde a la corriente en amperes (A).

Esta relación permitió obtener la potencia generada en cada ángulo evaluado, considerando que las mediciones se realizaron bajo condiciones instantáneas.

Posteriormente, con el objetivo de comparar el rendimiento relativo entre las distintas posiciones angulares, se calculó la eficiencia relativa tomando como referencia la potencia máxima obtenida durante la prueba.

La eficiencia relativa se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{rel} (\%) = \frac{P_i}{P_{max}} \times 100$$

donde:

$P_i$  es la potencia correspondiente a cada ángulo,

$P_{max}$  es la potencia máxima registrada en la configuración analizada,

$\eta_{rel}$  representa la eficiencia relativa porcentual.

## 5.2 CONFIGURACIÓN EN PARALELO

La primera fase experimental se desarrolló con dos módulos conectados en paralelo. Desde el punto de vista teórico, esta configuración mantiene la tensión cercana al valor nominal de un módulo individual y suma las corrientes generadas por cada panel. Para el análisis se consideraron las mediciones registradas a lo largo del rango angular evaluado, correspondientes a 61 posiciones obtenidas mediante incrementos de  $1^\circ$ , lo que permitió contar con un conjunto de datos suficiente para examinar la variación de los parámetros eléctricos de

voltaje, corriente, inclinación, temperatura y potencia del sistema. Los datos registrados y calculados se evidencian en el Anexo K.

En la Figura 5.4 se muestra el comportamiento del voltaje en función del ángulo de inclinación, donde se aprecia la tensión prácticamente constante, en la Figura 5.5 se presenta la variación de la corriente respecto al ángulo.

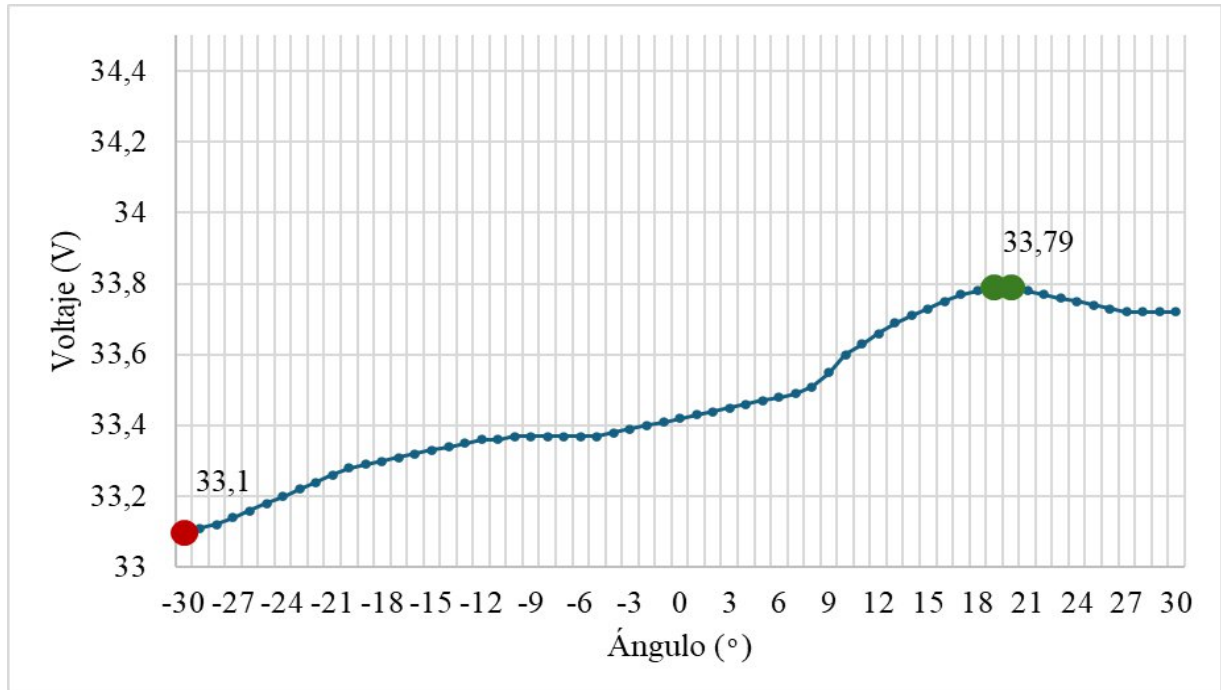


Figura 5.4: Voltaje vs Ángulo – Configuración en Paralelo.

La gráfica muestra la variación del voltaje del arreglo fotovoltaico en función del ángulo de inclinación para la configuración en paralelo de dos módulos. Se observa que la tensión del sistema presentó un comportamiento relativamente estable a lo largo del intervalo angular evaluado.

El valor mínimo de voltaje se registra alrededor de  $-30^\circ$ , con aproximadamente 33,1 V, mientras que el valor máximo se alcanza cerca de  $20^\circ$ , donde se obtiene una tensión aproximada de 33,79 V. La curva evidencia un incremento progresivo del voltaje desde los ángulos negativos hasta valores cercanos a  $20^\circ$ , asociado a una mejor orientación del panel respecto a la radiación solar incidente.

Posteriormente, para ángulos mayores, se observa una ligera disminución de la tensión, manteniéndose dentro de un rango cercano a 33,7 V. En general, la curva muestra que el voltaje presentó baja variación frente a cambios en la inclinación, comportamiento característico de los arreglos fotovoltaicos en paralelo, donde las variaciones de irradiancia afectan principalmente la corriente generada.

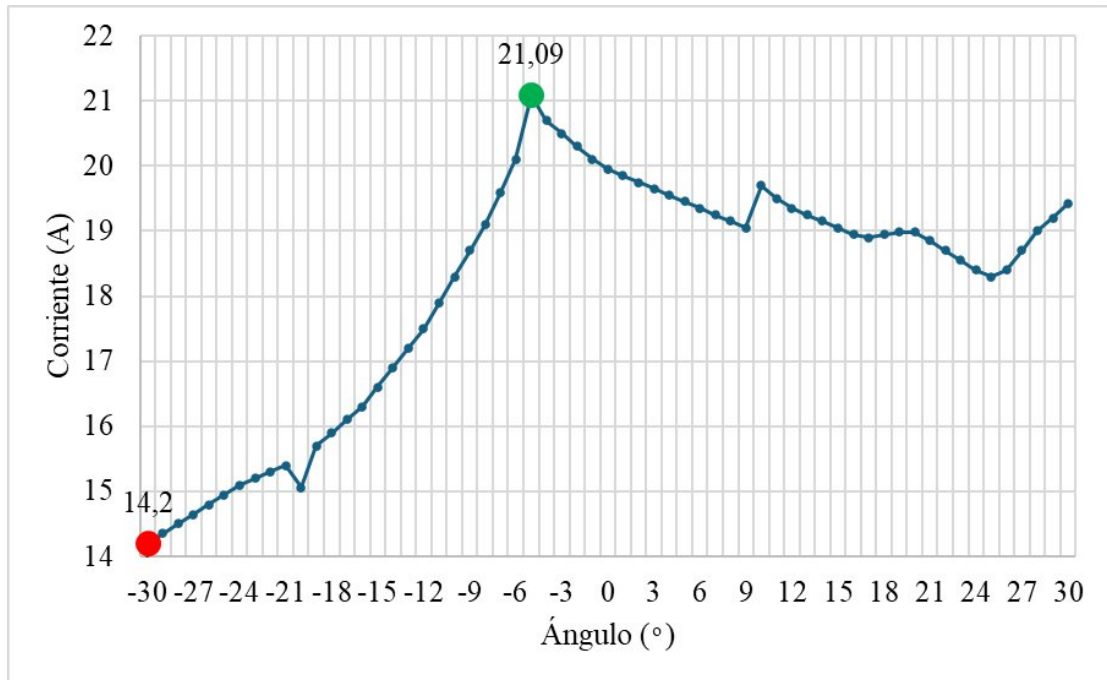


Figura 5.5: Corriente vs Ángulo – Configuración en Paralelo.

La gráfica de corriente a diferencia del voltaje, muestra mayor sensibilidad frente a los cambios de orientación del panel, evidenciando una variación más pronunciada a lo largo del rango angular evaluado. El valor mínimo de corriente se registra alrededor de  $-30^\circ$ , con aproximadamente 14,2 A, mientras que el valor máximo se alcanza cerca de  $-5^\circ$ , donde se obtiene una corriente de aproximadamente 21,09 A, correspondiente al punto de mayor generación eléctrica observado en la figura.

Desde los ángulos negativos hasta este punto máximo se aprecia un incremento progresivo de la corriente. Al aumentar el ángulo hacia valores positivos, la corriente evidenció una disminución gradual, manteniéndose en un rango aproximado de 18A – 19 A. Este comportamiento reflejó la relación directa entre la corriente y la irradiancia incidente, característica típica, donde pequeñas variaciones en la orientación del panel pueden producir cambios significativos en la corriente.

A partir de los valores medidos por el instrumento patrón se calculó las potencias y la eficiencia correspondientes a la conexión en paralelo y se presentan en el Anexo L, mientras que en la Figura 5.6 se ilustra su comportamiento frente al ángulo.

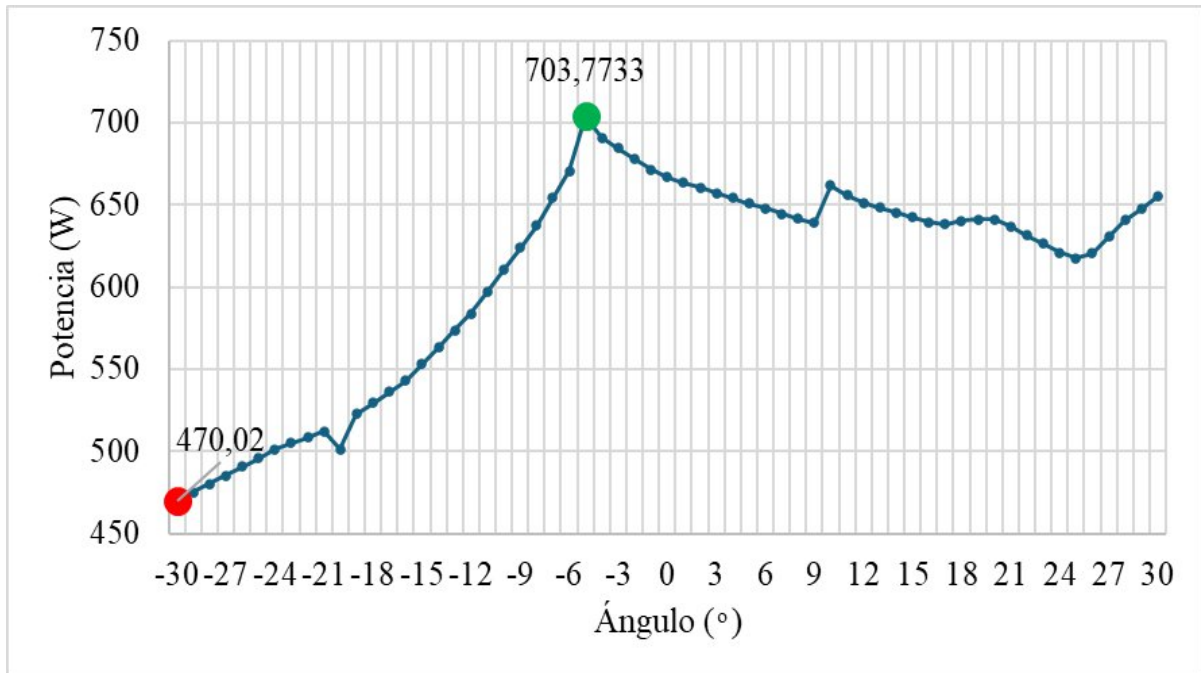


Figura 5.6: Potencia vs Ángulo de la configuración en paralelo.

Se observa que la potencia aumentó progresivamente desde los ángulos más negativos hasta alcanzar su valor máximo de aproximadamente 703,77 W en  $-5^\circ$ , punto que corresponde a la condición de mayor desempeño energético del sistema. El valor mínimo se registra en  $-30^\circ$ , con una potencia cercana a 470,02 W, lo que refleja una menor captación de radiación debido a la orientación desfavorable del panel. A partir del punto máximo, la curva muestra una disminución gradual hacia los ángulos positivos, manteniéndose generalmente en un rango aproximado entre 630 W y 660 W.

En términos de eficiencia relativa, el mayor valor también se presenta en  $-5^\circ$  con 100 %, mientras que en posiciones cercanas la eficiencia se mantiene elevada, evidenciando una zona de operación favorable alrededor de ese ángulo. Por el contrario, en ángulos más alejados, como  $-30^\circ$ , la eficiencia desciende hasta valores cercanos al 66,79 %.

### 5.3 CONFIGURACIÓN EN SERIE

La segunda fase experimental se realizó utilizando dos módulos fotovoltaicos conectados en serie. Teóricamente en este tipo de configuración, el arreglo incrementa el nivel de tensión al combinar los voltajes generados por cada módulo, mientras que la corriente permanece cercana al valor producido por un solo panel. Para el análisis se consideró mediciones obtenidas durante el barrido angular del sistema, correspondiente a 61 posiciones evaluadas con incrementos de

1°, lo que permitió observar y registrar las mediciones de voltaje, corriente, inclinación y temperatura; estos datos se evidencian en el Anexo N.

Los parámetros eléctricos medidos por el sistema de monitoreo en la configuración en serie se observan a continuación, el comportamiento de voltaje en la Figura 5.7 mientras que en la Figura 5.8 describe la variación de la corriente respecto al ángulo.

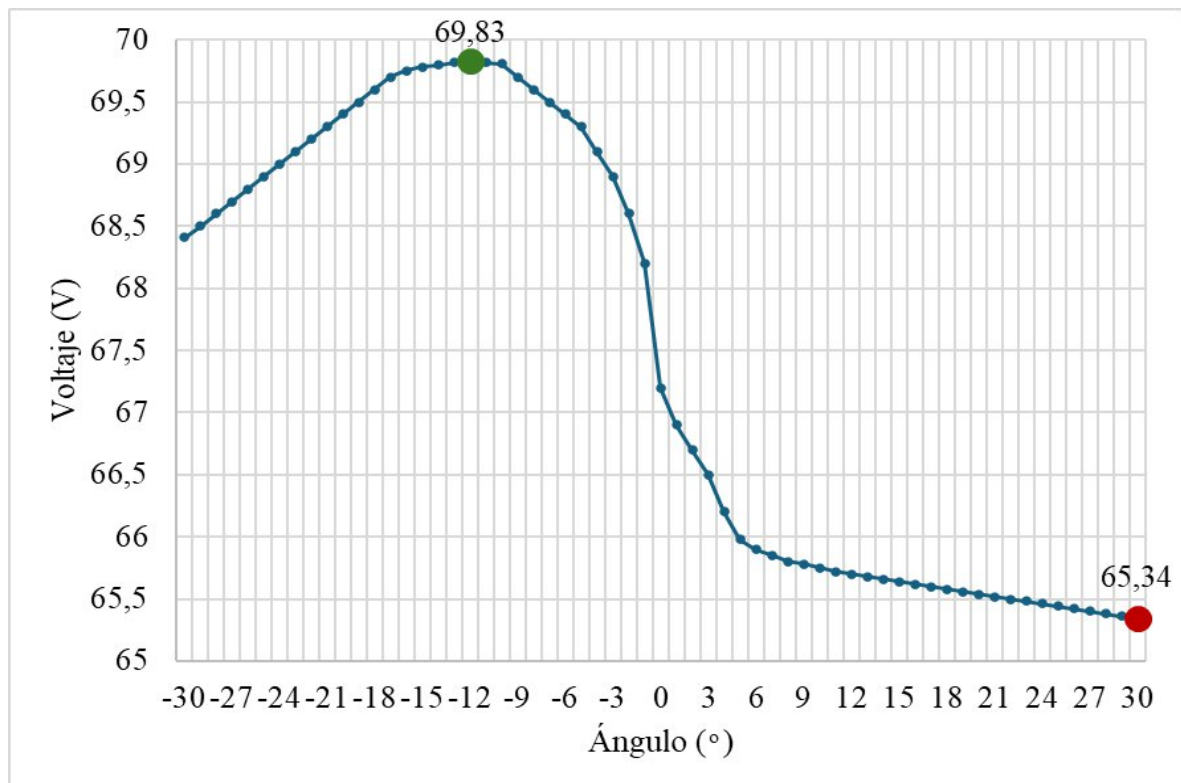


Figura 5.7: Voltaje vs Ángulo – Configuración en Serie.

La Figura 5.7 muestra la variación del voltaje del arreglo fotovoltaico en función del ángulo de inclinación para la configuración en serie. Se observa que la tensión presentó un incremento gradual desde los ángulos negativos hasta alcanzar un valor máximo de aproximadamente 69,83 V alrededor de  $-12^\circ$ , a partir de este punto, la curva evidencia una disminución progresiva del voltaje conforme el ángulo se desplaza hacia valores positivos, esta reducción es más pronunciada cerca de la zona central y se estabiliza en valores cercanos a 65–66 V.

El valor mínimo de voltaje se registró alrededor de  $30^\circ$ , con aproximadamente 65,34 V, lo que indica una menor condición de generación eléctrica asociada a una orientación menos favorable respecto a la radiación solar incidente, en el arreglo en serie las pequeñas variaciones en la orientación del sistema producen cambios considerables en el voltaje total del arreglo.

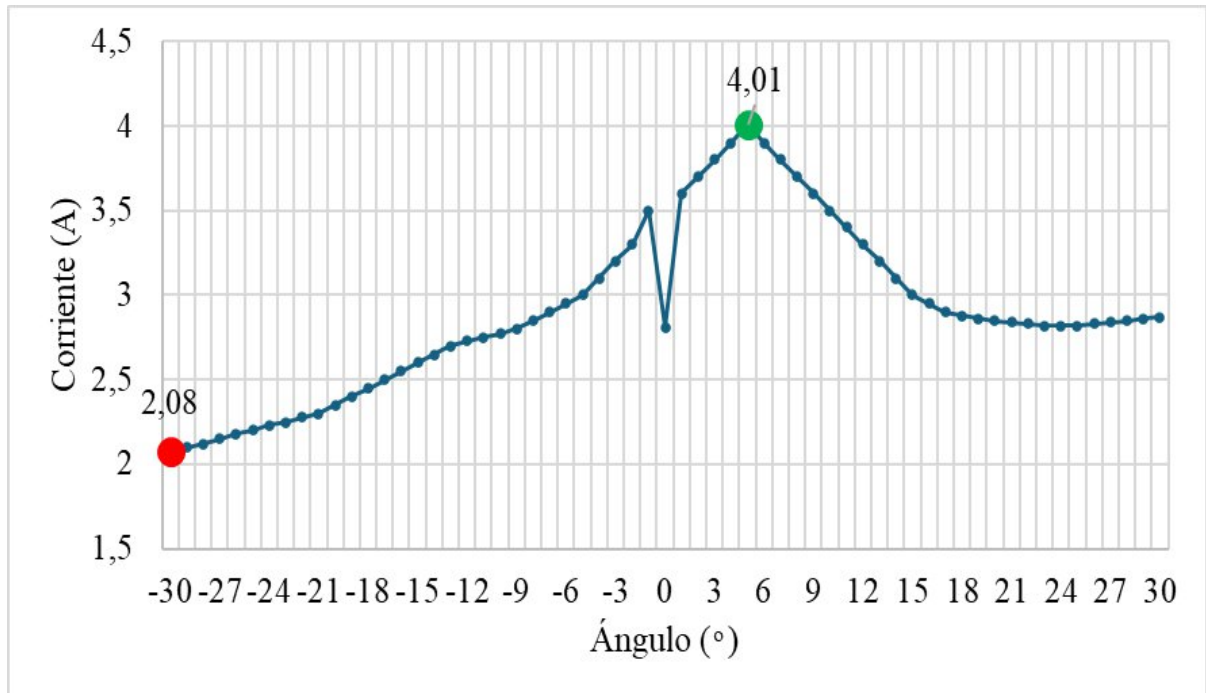


Figura 5.8: Corriente vs Ángulo – Configuración en Serie.

Se observa que la corriente experimenta un incremento progresivo desde los ángulos negativos, partiendo de un valor mínimo cercano a 2,08 A en  $-30^\circ$ , hasta alcanzar su valor máximo de aproximadamente 4,01 A alrededor de  $6^\circ$ . Este comportamiento refleja una mejora en las condiciones de captación de radiación solar conforme el panel se orienta hacia posiciones más favorables.

A partir del punto máximo, la corriente presenta una disminución gradual hacia los ángulos positivos, estabilizándose en valores cercanos a 2,8 A – 3,0 A en gran parte del intervalo final. La curva evidencia que la corriente en la configuración en serie es más sensible a la variación del ángulo de inclinación, mostrando cambios notorios en comparación con el voltaje.

A partir de los valores medidos por el instrumento patrón se calculó las potencias y la eficiencia correspondientes a la conexión en serie, estos datos se presentan en el Anexo O y la gráfica representativa en la Figura 5.9.

La variación de la potencia generada por el arreglo fotovoltaico en función del ángulo de inclinación para la configuración en serie presenta un incremento progresivo desde los ángulos negativos, partiendo de un valor mínimo cercano a 142,29 W en  $-30^\circ$ , hasta alcanzar su valor máximo de aproximadamente 264,58 W alrededor de  $6^\circ$ , punto en el cual el sistema registra su mayor desempeño energético. Este comportamiento indica que la generación de energía aumentó de forma significativa con la incidencia de irradiancia. Posteriormente, al continuar

aumentando el ángulo hacia valores positivos, la potencia experimenta una disminución gradual, estabilizándose en valores cercanos a 185–190 W en el tramo final del intervalo evaluado.

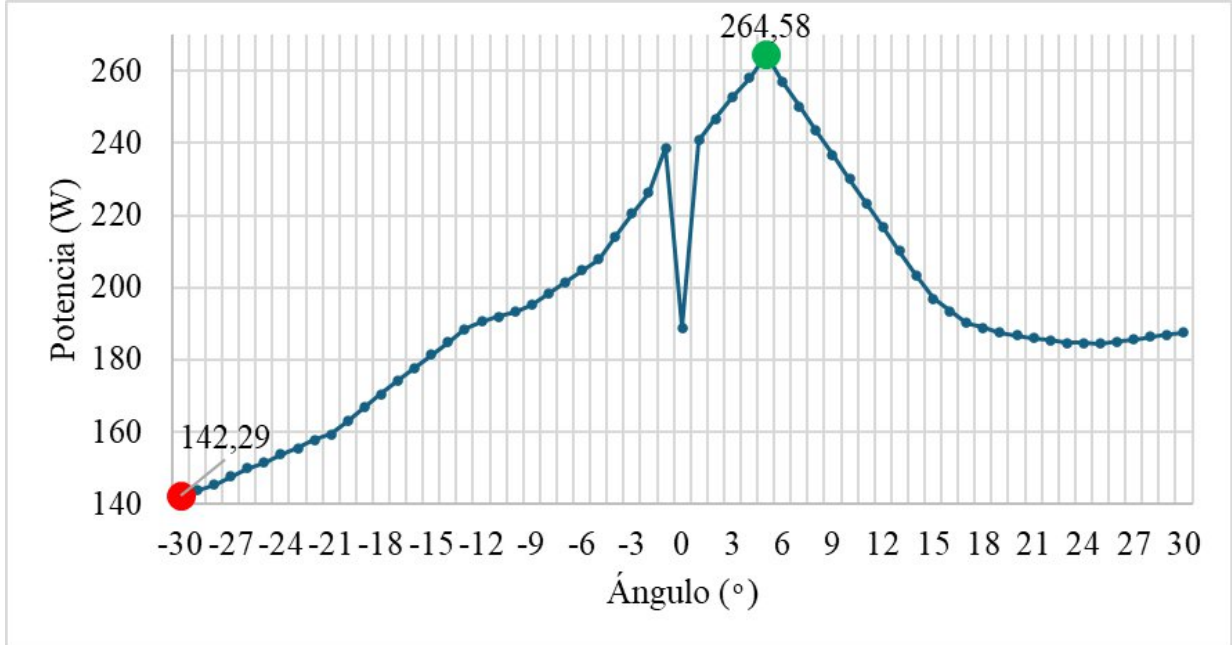


Figura 5.9: Potencia vs Ángulo de la configuración en serie.

En términos de eficiencia relativa, el punto de máxima potencia corresponde también al 100 % de eficiencia alrededor de 6°, mientras que en  $-30^\circ$  la eficiencia disminuye considerablemente debido a la menor captación de radiación solar, lo que evidencia la influencia directa de la inclinación del panel en el rendimiento energético en esta configuración.

#### 5.4 COMPARACIÓN GLOBAL ENTRE CONFIGURACIONES

Se comparó los resultados de potencia máxima y el comportamiento general en ambas configuraciones. En conexión en paralelo, la potencia máxima fue 703,77 W ( $-5^\circ$ ), mientras que en conexión en serie fue 264,58 W ( $5^\circ$ ). La diferencia porcentual respecto a la conexión en serie se determinó mediante:

$$\Delta(\%) = \frac{P_{max,paralelo} - P_{max,serie}}{P_{max,serie}} \times 100$$

$$\Delta(\%) = \frac{703,77 - 264,58}{264,58} \times 100$$

$$\Delta(\%) \approx 166\%$$

Esto evidenció que, bajo las condiciones evaluadas, la configuración en paralelo presentó un rendimiento significativamente superior, explicado principalmente por el incremento de

corriente disponible. Para visualizar comparativamente los datos, se elaboró la Figura 5.10, donde se representó los puntos de potencia de ambas configuraciones en un mismo plano.

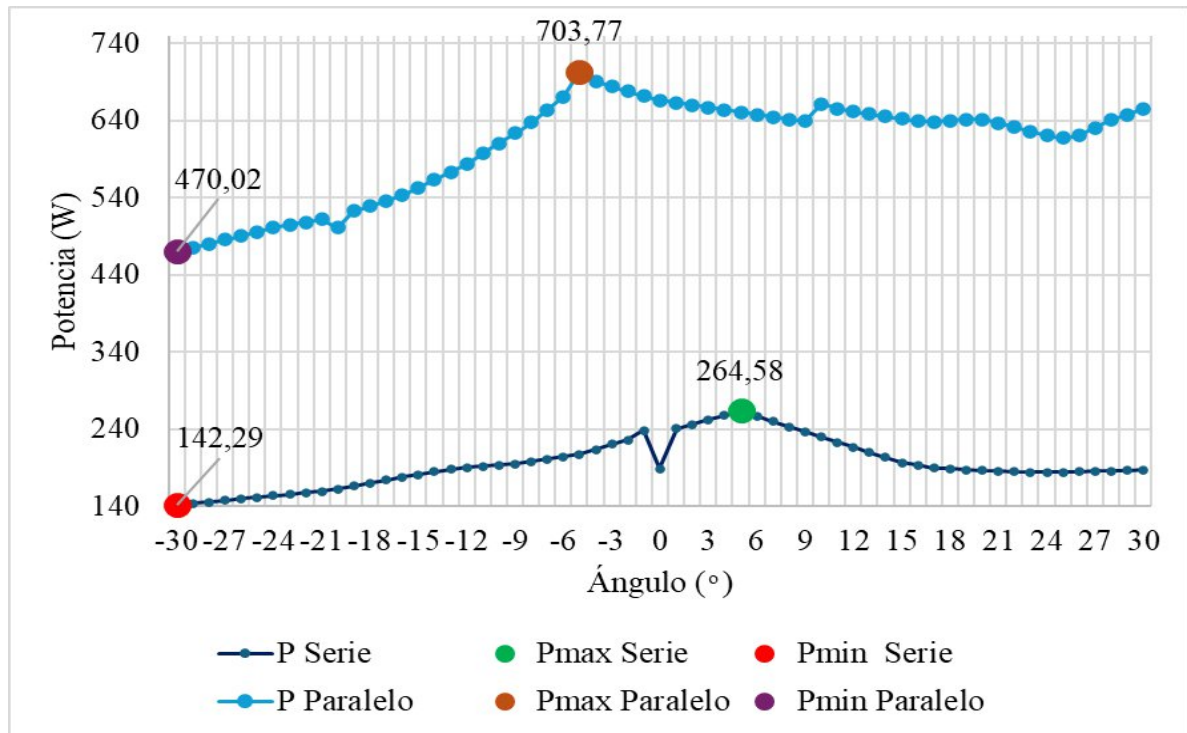


Figura 5.10: Comparación de potencia – Paralelo vs Serie.

Se observa que la conexión en paralelo mantiene valores de potencia más elevados en todo el intervalo angular, con un comportamiento relativamente estable entre 630 W y 670 W, alcanzando su punto máximo cerca de  $-5^{\circ}$ . En contraste, la configuración en serie presenta valores de potencia significativamente menores, con un máximo de 264,58 W y un mínimo cercano a 142,29 W en  $-30^{\circ}$ , evidenciando una mayor sensibilidad a los cambios de inclinación.

Desde el punto de vista de la eficiencia relativa, la configuración en paralelo mantiene niveles más altos en un rango angular más amplio, superando el 90 % de eficiencia aproximadamente entre  $-7^{\circ}$  y  $-3^{\circ}$ . En cambio, en la configuración en serie la eficiencia disminuye con mayor rapidez a medida que el ángulo se aleja de su punto óptimo.

La diferencia observada entre ambas curvas se explica por la naturaleza de cada tipo de conexión. En paralelo, la corriente total del sistema aumenta al sumarse las corrientes de los módulos, lo que permite alcanzar mayores niveles de potencia y mantener un rendimiento más estable frente a variaciones de orientación. Por el contrario, en la conexión en serie la corriente del arreglo permanece limitada por la capacidad de los módulos, lo que reduce la potencia disponible y hace que el sistema sea sensible a cambios en el ángulo de inclinación.

## 5.5 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DESARROLLADO

Para validar el sistema de monitoreo desarrollado, se utilizó como equipos de referencia de medida (equipos de la Universidad Técnica de Cotopaxi) un voltímetro digital y una pinza amperimétrica digital, a partir de estas mediciones, se cuantificó el error del sistema desarrollado respecto a dichos instrumentos. Para cada variable se calcularon el error absoluto y el error relativo porcentual mediante:

$$EA = |X_{sistema} - X_{FLUKE}|$$
$$ER(\%) = \frac{|X_{sistema} - X_{FLUKE}|}{X_{FLUKE}} \times 100$$

- **Validación en la configuración en paralelo.** En el Anexo M se presentan los errores de medición de la corriente y voltaje, donde los valores registrados por el sistema de monitoreo con los medidos por el instrumento de referencia presentaron errores absolutos de voltaje en un rango reducido, generalmente inferiores a 0,10 V, lo que correspondió a errores relativos menores al 0,3 % en la mayoría de las mediciones. Este comportamiento evidenció una alta concordancia entre ambos instrumentos en la medición de la tensión, lo que permitió verificar la confiabilidad del sistema para el registro de este parámetro eléctrico. En el caso de la corriente, los valores obtenidos mostraron una mayor variabilidad en comparación con el voltaje. La mayoría de las mediciones registró errores relativos comprendidos aproximadamente entre 1 % y 3 %, valores que se consideran aceptables dentro de procesos de medición experimental en sistemas fotovoltaicos. No obstante, en algunos ángulos específicos se registraron discrepancias ligeramente superiores, particularmente en  $-5^\circ$  y  $10^\circ$ , donde el error relativo superó el 4 %. Estas diferencias pudieron estar asociadas a variaciones instantáneas en la irradiancia solar o a la sensibilidad del sensor de corriente frente a cambios en las condiciones de operación del sistema.
- **Validación en la configuración en serie.** El Anexo P presenta los errores de medición obtenidos al comparar los valores registrados por los equipos de referencia de medida (equipos de la Universidad Técnica de Cotopaxi) para la configuración en serie. Los errores absolutos de voltaje se mantuvieron generalmente cercanos a 0,10 V, alcanzando en algunos casos valores ligeramente superiores, aunque los errores relativos se mantuvieron por debajo del 0,3 % en la mayor parte de las mediciones. Este comportamiento evidenció una alta coincidencia entre el sistema implementado lo que permitió validar la precisión del sistema para este parámetro.

En cuanto a la corriente, se observó una variabilidad mayor en gran parte de los ángulos evaluados, los errores relativos se situaron aproximadamente entre el 5 % y el 10 %, lo cual se asoció con la sensibilidad del sensor de corriente y con las variaciones propias de las condiciones ambientales durante el proceso experimental. En los ángulos donde la corriente generada fue menor, los errores relativos tendieron a incrementarse, debido a que pequeñas diferencias absolutas producen variaciones porcentuales más significativas.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 CONCLUSIONES**

- A partir de la revisión bibliográfica sobre sistemas fotovoltaicos, se identificaron los parámetros eléctricos que influyen en el rendimiento de los paneles solares, como voltaje, corriente, potencia y eficiencia, además el efecto que produce el ángulo de inclinación lo cual permitió establecer las bases teóricas necesarias para el desarrollo del prototipo de análisis experimental.
- Se diseñó el prototipo en base a la infraestructura previamente construida identificando parámetros geométricos y de posicionamiento del actuador, en retracción total 1237mm y en extensión total 2232mm con un intervalo angular de trabajo, facilitando el modelamiento matemático del sistema e implementación del algoritmo de control.
- Se integraron correctamente los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos del sistema, permitiendo el funcionamiento del seguidor solar y la medición de los parámetros eléctricos bajo distintos ángulos de inclinación. Esto permitió obtener datos experimentales confiables para evaluar el comportamiento del sistema fotovoltaico en condiciones reales de operación.
- Se implementó un sistema de variación de posición para paneles fotovoltaicos que permitió monitorear y analizar la variación de los parámetros eléctricos del sistema bajo diferentes ángulos de inclinación y configuraciones de conexión, determinó una potencia máxima de 703,77 W en la configuración en paralelo a un ángulo de  $-5^\circ$ , mientras que en la configuración en serie se obtuvo una potencia máxima de 264,58 W a un ángulo cercano a  $5^\circ$ , lo que evidenció la influencia directa tanto del ángulo de inclinación como del tipo de conexión eléctrica en el desempeño energético del sistema bajo condiciones reales de operación.

- Las pruebas de funcionamiento realizadas permitieron validar el desempeño del prototipo de variación de posición, evidenciando que el sistema respondió de forma adecuada al control de posicionamiento. El barrido experimental de  $-30^\circ$  a  $30^\circ$  con incrementos de  $1^\circ$  permitió verificar la estabilidad del sistema y la correcta adquisición de los parámetros eléctricos, confirmando que el prototipo es funcional.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar el desarrollo del sistema de seguimiento solar incorporando sensores adicionales de irradiancia y temperatura, con el fin de mejorar el análisis del comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico y optimizar la generación de energía.
- Se recomienda realizar investigaciones incorporando un mayor número de módulos fotovoltaicos y evaluando configuraciones mixtas, con el fin de ampliar el análisis del comportamiento eléctrico y energético del sistema fotovoltaico.
- Se recomienda continuar optimizando el sistema de control del seguidor solar mediante el ajuste de los parámetros del controlador PID y la implementación de algoritmos de seguimiento solar automático, con el propósito de mejorar el posicionamiento del panel y maximizar la captación de radiación solar durante todo el día
- Se recomienda verificar periódicamente las dimensiones y condiciones mecánicas del sistema de inclinación, especialmente la longitud efectiva del actuador y los ángulos límite de operación, para asegurar que el mecanismo mantenga el intervalo de trabajo previsto entre  $-30^\circ$  y  $30^\circ$ .
- Se recomienda realizar procesos de calibración periódica de los instrumentos de medición y comparar los resultados del sistema desarrollado con equipos patrón, con el fin de mejorar la precisión en la validación experimental del prototipo y garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos durante las pruebas de funcionamiento.

## 7. Bibliografía

- [1] T. Kevin, «Generación de energía eléctrica a través de un sistemas fotovoltaico en la zona rural,» [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24665/1/UPS-GT004259.pdf>.
- [2] C. Roberto, «Estudio de factibilidad dirigida a la implementación de paneles solares para proveer energía en una casa promedio del cantón Paján,» septiembre 2023. [En línea].

Available:

<https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/5922/1/CARDENAS%20REYES%20SARA%20FERNANDA.pdf>.

- [3] C. G. Mónica, «Repositorio Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,» 2012. [En línea]. Available: <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/8a4abd1d-09df-469c-b1e4-0d6d1386ae80/content>.
- [4] R. T. Sanchez, «Repositorio Universidad Nacional Autónoma de México,» mayo 2016. [En línea]. Available: <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2016/abril/0743994/0743994.pdf>.
- [5] A. C. Macías, «Repositorio Universidad Politécnica Salesiana,» 2024. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27297/1/UPS-GT004956.pdf>.
- [6] M. F. Castro, *Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica*, La Habana, Cuba: Redalyc.org, 2018.
- [7] E. d. e. Repsol, «Aprovechando al máximo la energía del sol,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/energia-solar/index.cshtml>.
- [8] A. Bautista, «energías renovables,» 18 diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.fundeen.com/ca/blog-energias-renovables/que-es-la-energia-solar-y-como-funciona?srsIid=AfmBOop2eg1Av9VuHN9ez4dQ51KZ0PUAwicANGxNn-JNSPSL4hvbK0KJ>.
- [9] Pacheco Torres L., *Diseño e innovación tecnológica " Eficiencia en paneles solares"*, Madrid, España: D. VOLT, 2018.
- [10] Enciclopedia de la energía , *Paneles solares o fotovoltaicos*, ScienceDirect, 2004.
- [11] W. Lindao, «Repositorio Univesidad Católica Santiago de Guayaquil. "Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica",» 7 febrero 2020. [En línea]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/14365/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-248.pdf>.

- [12] E. Group, «RenewSyS India,» 15 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.renewsysworld.com/post/poe-encapsulant-in-solar-panels-properties-advantages>.
- [13] WiSolar, «WiSolar,» 17 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://wisolar.co/layers-that-make-up-a-solar-panel/>.
- [14] E. Demesol, «Soluciones Demesol,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.demesol.com/blog/el-vidrio-fotovoltaico>.
- [15] A. solar, «Energía solar,» [En línea]. Available: <https://autosolar.pe/energia-solar/partes-de-un-panel-solar?srsltid=AfmBOoqDxAs8NdHO5At4nzTCS1b2OgixXvTBK4D9Wg1SGjDbvLabGHgK>.
- [16] P. Melendez, «CITSolar,» 20 diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://citsolar.mx/componentes-de-un-panel-fotovoltaico-todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-energia-solar/>.
- [17] A. Villamar, «Diseño de un sistema fotovoltaico como fuente distribuida en el campus dela UCSG,» 3 marzo 2022. [En línea]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/18043/1/T-UCSG-PRE-TEC-IELE-3.pdf>.
- [18] J. P. & A. Morales, Productividad de paneles solares, España, 2018.
- [19] EcoFlow, «Paneles solares tu viaje paso a paso hacia la energía limpia,» 15 mayo 2025. [En línea]. Available: <https://www.ecoflow.com/mx/blog/how-solar-panels-work>.
- [20] S. Cushicóndor, «Repositorio de la Escuela Politécnica Nacional,» abril 2019. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20171/1/CD%209640.pdf>.
- [21] M. Cappelletti, «Análisis Numérico de celdas solares,» febrero 2013. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curvas-corriente-tension-y-potencia-tension-de-una-celda-solar\\_fig1\\_254258421](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curvas-corriente-tension-y-potencia-tension-de-una-celda-solar_fig1_254258421).
- [22] E. empresa, «Seguidor del punto máximo de potencia,» 28 enero 2021. [En línea]. Available: <https://eadic.com/blog/entrada/seguidor-del-punto-de-maxima-potencia-mppt-que-es-el-mppt/>.

- [23] A. Guayubas, Energías renovables, Enciclopedia Conceptos, 2024.
- [24] J. A. Alonso, «Energía solar, aprovechamiento, tipos y usos,» 20 mayo 2025. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/energia-solar/?srsltid=AfmBOoqykT8jL9rxQfGldTNCfzto1oodSiJWcR88aJ61YRUwl0bWpThU>.
- [25] G. C. Asri, «Entendiendo la energía solar fotovoltaica,» 8 julio 2025. [En línea]. Available: <https://chandra-asri.com/en/blog/solar-photovoltaic>.
- [26] I. p. l. D. y. A. d. l. e. energía, «Tecnologías, energías renovables,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>.
- [27] F. S. Huawei, «Sistema de energía solar: Lo que tienes que saber,» 2 septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://solar.huawei.com/es/blog/2024/solar-power-system/>.
- [28] P. O., Energía solar fotovoltaica, Madrid: Creative Commons, 2020.
- [29] C. & C. Calero, «Tipos de sistemas fotovoltaicos,» España, 2009.
- [30] B. C. A., «Repositorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional del Centro de Perú,» 2018. [En línea].
- [31] M. K., «Diseño óptimo de sistemas aislados fotovoltaicos para la iluminación de la vía principal de la Comuna Masa 2,» Guayaquil, 2021.
- [32] P. O., Energía solar fotovoltaica, Madrid, España: Creative Commons, 2020.
- [33] N. & R. Guevara, Sistemas fotovoltaicos autónomos, google imágenes, 2015.
- [34] C. Solar, «Sistema fotovoltaico híbrido,» 3 enero 2025. [En línea]. Available: <https://www.csgsolar.cl/blog/>.
- [35] Peñafiel Morales J. & Gómez Bravo A., «Implementación de paneles solares fotovoltaicos aplicados al área residencial de un sector costero,» 2022. [En línea].
- [36] J. Alvarado, Diseño de instalaciones fotovoltaica a partir de módulos de generación de energía, Madrid, España: Tecnos editorial, 2017.
- [37] J. Gálvez, «Diseño e implementación de un sistema de generación fotovoltaica de 1,2kW

conectado a la red de la empresa automatizaciones SIMOTIC para disminuir el uso de energía convencional,» 4 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23600/1/UPS%20-%20TTS1101.pdf>.

[38] R. Linacero, «Noticias protecciones fotovoltaicas,» 4 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://mintforpeople.com/noticias/protecciones-fotovoltaicas/>.

[39] J. Simbaña y L. Supe, «IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE POSICIONAMIENTO ANGULAR DE 1 EJE EN UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA DE 1 KW,» Latacunga, 2023.