UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA MEDICIONES EN PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS DEL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA Y ENERGÍAS SUSTENTABLES.

Autores: Mairalys Paola Camacho Polanco y Luis Jairo Pilataxi Constante

Director: Phd. Francisco Javier Montero Moya

04 de Agosto de 2026



Agenda

01 Introducción

02 Planteamiento del problema

03 Objetivos

04 Marco teórico

05 Metodología

06 Justificación y alcance

07 Desarrollo

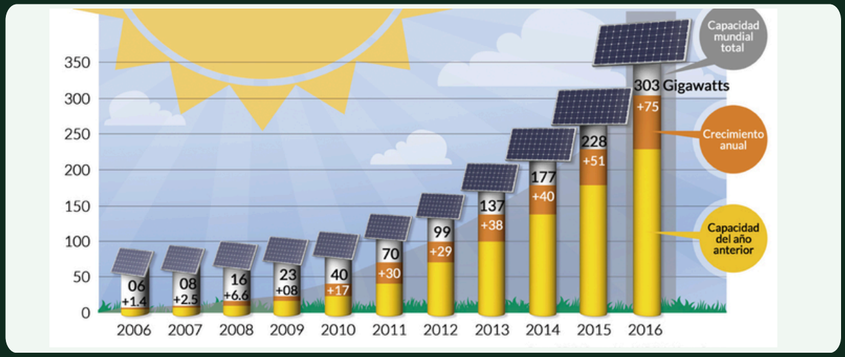
08 Resultados y discusión

09 Conclusiones



Introducción

Crecimiento fotovoltaico, operación real y formación experimental



MUNDO

En 2025 se incorporaron 510,3 GW de nueva capacidad solar fotovoltaica, confirmando su rápido crecimiento mundial.

ESPAÑA

La energía fotovoltaica alcanzó cerca de 50 GW instalados y representó el 33,1 % de la capacidad de generación, incluyendo autoconsumo.

LATINOAMÉRICA Y ECUADOR

En América Latina y el Caribe, la generación eólica y solar creció un 19 % durante 2025. En Ecuador, las centrales fotovoltaicas registraron 29,13 MW, equivalentes al 0,32 % de la potencia efectiva nacional.

OPERACIÓN REAL Y FORMACIÓN

- La expansión exige evaluar el comportamiento de los módulos fuera de condiciones estandarizadas, considerando variaciones ambientales reales.

- Las universidades requieren plataformas que relacionen fundamentos teóricos con mediciones reales y análisis del comportamiento fotovoltaico.

Fuentes: IRENA, Red Eléctrica de España, OLACDE y ARCONEL. Datos de 2025.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

01

Recursos disponibles

Dos paneles fotovoltaicos ARCO de 43 W, un piranómetro NovaLynx 240-CMP3 y reóstatos de potencia.

02

Falta de integración

Los equipos se encontraban aislados y no existía una estructura regulable para los paneles.

03

Mediciones no sincronizadas

Las variables eléctricas, térmicas y ambientales se registraban mediante instrumentos independientes.

04

Caracterización limitada

No era posible obtener y almacenar curvas I-V y P-V mediante un procedimiento integrado y reproducible.

PROBLEMA CENTRAL

El laboratorio no contaba con una plataforma que integrara soporte regulable, instrumentación, adquisición y procesamiento de datos para caracterizar paneles fotovoltaicos.

Objetivos

Objetivo Específico 1

Diseñar y construir la estructura de soporte con variación de inclinación para dos paneles solares.

Objetivo Específico 2

Implementar la instrumentación necesaria en el banco de pruebas incluyendo piranómetro, voltímetro, amperímetro, reóstatos y sensores de temperatura.

Objetivo Específico 3

Diseñar y construir un sistema de adquisición de datos para parámetros eléctricos y térmicos del banco de ensayos para mediciones de paneles solares fotovoltaicos.

Objetivo Específico 4

Diseñar e implementar el sistema informático de procesamiento de información de las características térmicas y eléctricas del banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos.



Marco teórico

MÓDULO FOTOVOLTAICO

Convierte la radiación solar en energía eléctrica de corriente continua.

⚡ CURVA I-V

Relaciona la corriente y el voltaje del módulo, permitiendo determinar Voc e Isc.

🌡️ INFLUENCIA AMBIENTAL

El aumento de temperatura reduce principalmente el voltaje y la potencia del módulo.

☀️ CONDICIONES AMBIENTALES

La irradiancia influye principalmente en la corriente, mientras que la temperatura reduce el voltaje.

PARÁMETROS FUNDAMENTALES

Voc — Voltaje de circuito abierto

Máximo voltaje del panel cuando no circula corriente: I = 0.

Isc — Corriente de cortocircuito

Máxima corriente cuando los terminales están en cortocircuito: V = 0.

Vmp — Voltaje de máxima potencia

Voltaje de operación correspondiente al punto de máxima potencia.

Imp — Corriente de máxima potencia

Corriente entregada por el panel en el punto de máxima potencia.

Pmax — Potencia máxima

Mayor potencia entregada por el módulo: Pmax = Vmp × Imp.

Metodología

1. REQUERIMIENTOS



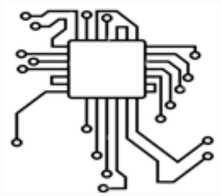


2. DISEÑO CONCEPTUAL

3a. MECÁNICA



3b. ELECTRÓNICO



3c. SOFTWARE



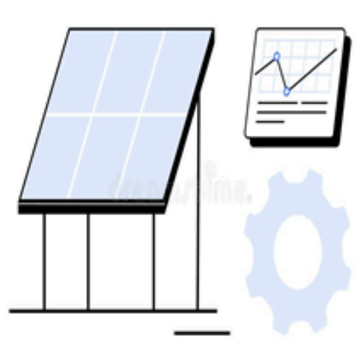
4. INTEGRACIÓN



5. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA



6. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL



VDI 2206

JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

⚡ ¿POR QUÉ SE REALIZÓ?

• Aprovechar los paneles, el piranómetro y los reóstatos disponibles en el laboratorio.
• Fortalecer la formación experimental de los estudiantes en energía fotovoltaica.
• Integrar los sistemas mecánico, eléctrico, electrónico y computacional en una plataforma funcional.

¿QUÉ COMPRENDE?

• Soporte para dos paneles con inclinación regulable entre 15° y 45°.
• Medición de voltaje, corriente, irradiancia y temperatura.
• Ensayos en configuración individual, serie y paralelo.
• Generación de curvas I-V y P-V, visualización y almacenamiento de resultados.



DESARROLLO

Fase de diseño, construcción e integración de los subsistemas mecánico, eléctrico, electrónico y computacional del banco de ensayos.



Etapas del proyecto

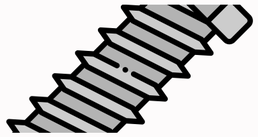
Diseño e integración física

Instrumentación y adquisición

Procesamiento y visualización

Validación experimental

ETAPA 1. DISEÑO E INTEGRACIÓN FÍSICA



ESTRUCTURA MECÁNICA

Soporte de acero galvanizado para dos paneles ARCO de 43 W. Inclinación regulable de 15° a 45° en pasos de 5°.



SISTEMA ELÉCTRICO

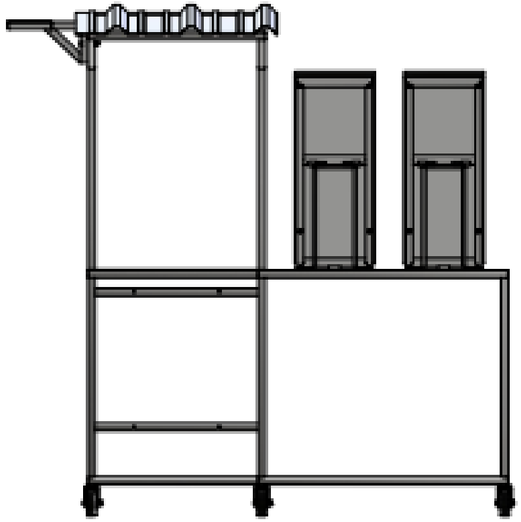
Tablero de 60 × 40 × 30 cm con protecciones y configuraciones individual, serie y paralelo.



INSTRUMENTACIÓN Y DAQ

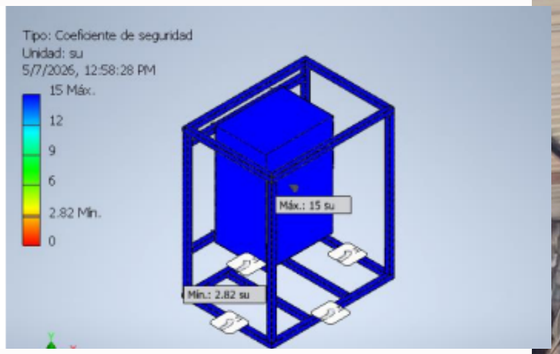
Sensores de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia integrados mediante ESP32 y ADS1115.





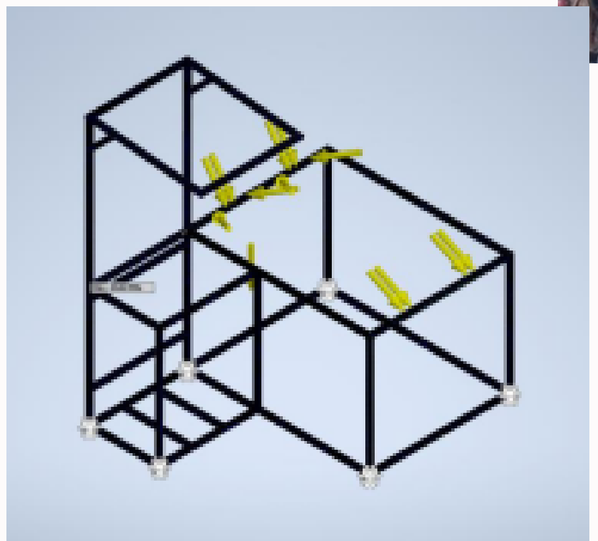








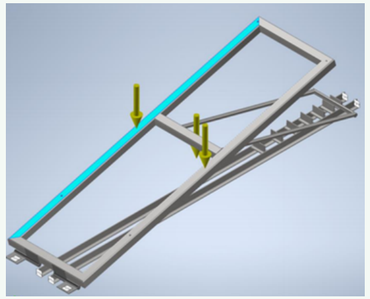
Estructura analizada	Factor de seguridad mínimo	Criterio	Resultado
Soporte angular regulable	**2,778**	FS > 1	Cumple
Estructura principal completa	**2,265**	FS > 1	Cumple

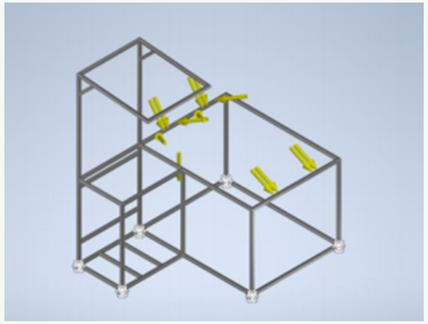




Diseño mecánico y validación estructural.







Requerimientos de diseño

- Soporte para dos paneles fotovoltaicos ARCO de 43 W.
- Estructura fabricada en acero galvanizado.
- Regulación manual entre 15° y 45°, en pasos de 5°.
- Estabilidad durante los ensayos y facilidad de operación.

Validación mediante análisis estático

- El comportamiento mecánico se evaluó en Autodesk Inventor.
- Consideró peso propio, gravedad, fuerzas externas, restricciones fijas y contactos entre elementos.

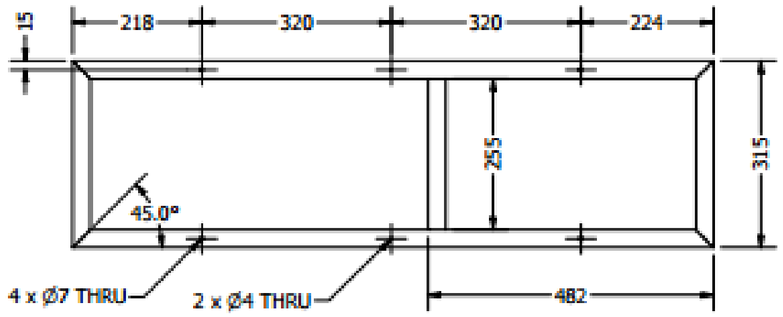
Diseño estructural

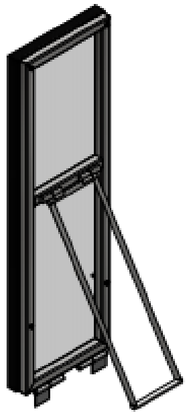
- La estructura se dividió en soporte angular móvil.
- El soporte angular móvil permite modificar y fijar la inclinación de cada panel.
- Estructura principal: sostiene los paneles, reóstatos, tablero eléctrico y elementos de instrumentación.

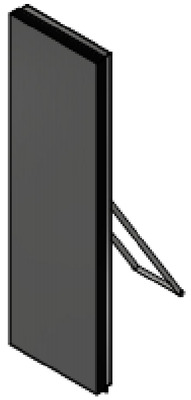
Resultados principales

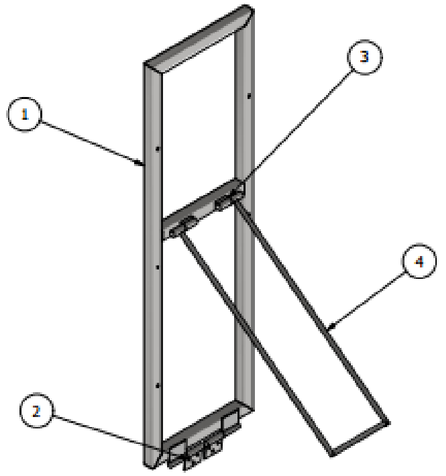
Elemento	Tensión Von Mises	Desplazamiento	Factor seg.
Soporte angular	74,517 MPa	0,273 mm	2,778
Estructura principal	91,385 MPa	2,218 mm	2,265

Las tensiones permanecieron por debajo del límite elástico de 207 MPa, confirmando que la estructura cumple con los criterios de resistencia, rigidez y seguridad.

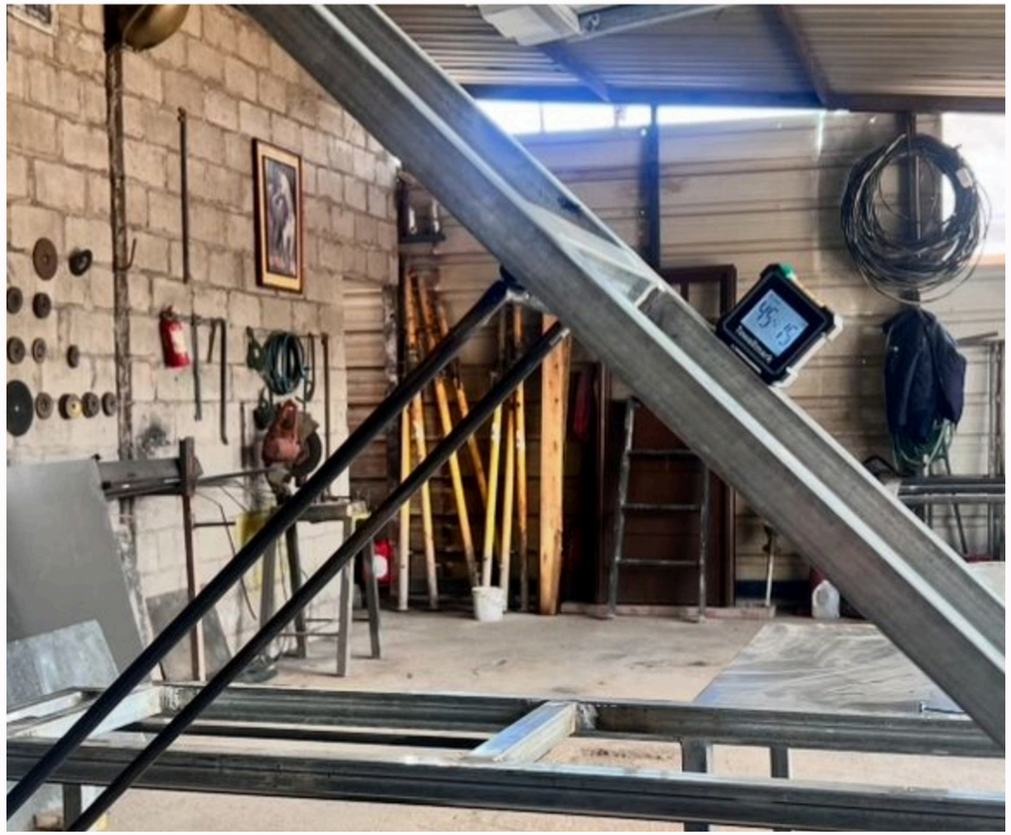


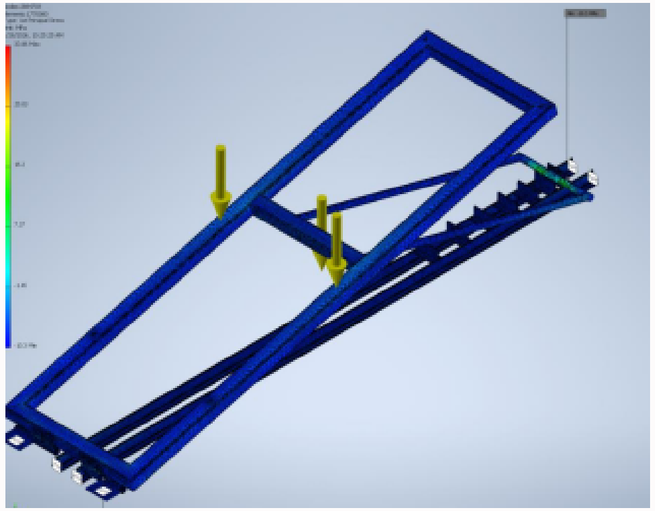






PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Diseño soporte metalico armado	
2	2	Bisagra Armillar 4 in macho perforado	Comprado
3	2	Bisagra Piston 5_8 in	Comprado
4	1	Soporte para panel solar	

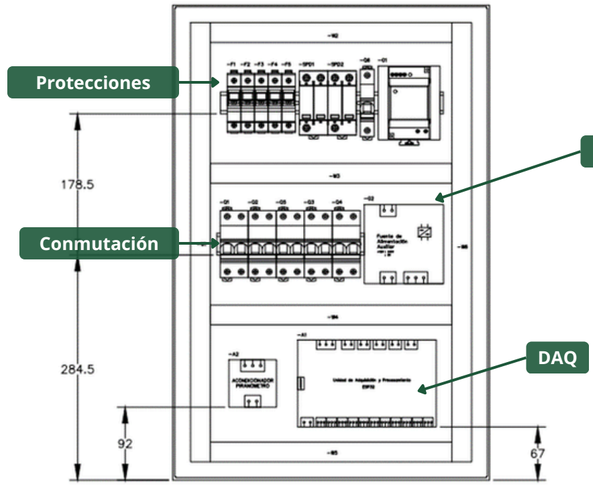


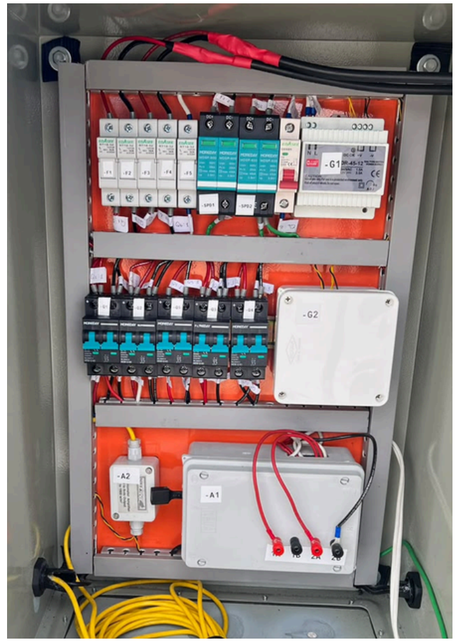


Sistema eléctrico de potencia y conmutación

Configuraciones de conexión de paneles fotovoltaicos

- **IPC-2221:** Criterios generales de diseño de PCB: ancho de pistas, separación, planos de tierra y distribución.
- **IPC-2152:** Dimensionamiento térmico y capacidad de corriente en pistas de PCB.
- **IEC 61010:** Protección de entradas, aislamiento y manejo seguro de voltajes hasta 40V.
- **IEC 61326:** Control de ruido, uso de filtros RC, desacoplos e integridad de señal (EMC).
- **ISO/IEC 17025:** Precisión, confiabilidad y calidad en la adquisición de datos.
- **IEC 62368-1:** Seguridad en equipos electrónicos y fuentes de alimentación (aplicable a módulos DC-DC).
- **IEEE 519:** Calidad de energía y reducción de perturbaciones o ruido eléctrico en la medición.
- **IEC 60617:** Símbolos gráficos normalizados para diagramas eléctricos y electrónicos (resistencias, capacitores, fuentes, sensores).





Una misma plataforma, tres configuraciones eléctricas de ensayo.

Voltaje máx. circuito abierto	85 V DC
Corriente máx. cortocircuito	18 A
Protecciones	Fusibles + DPS clase II
Conmutación	Contactores AC/DC
Medición	DAQ NI + sensores calibrados

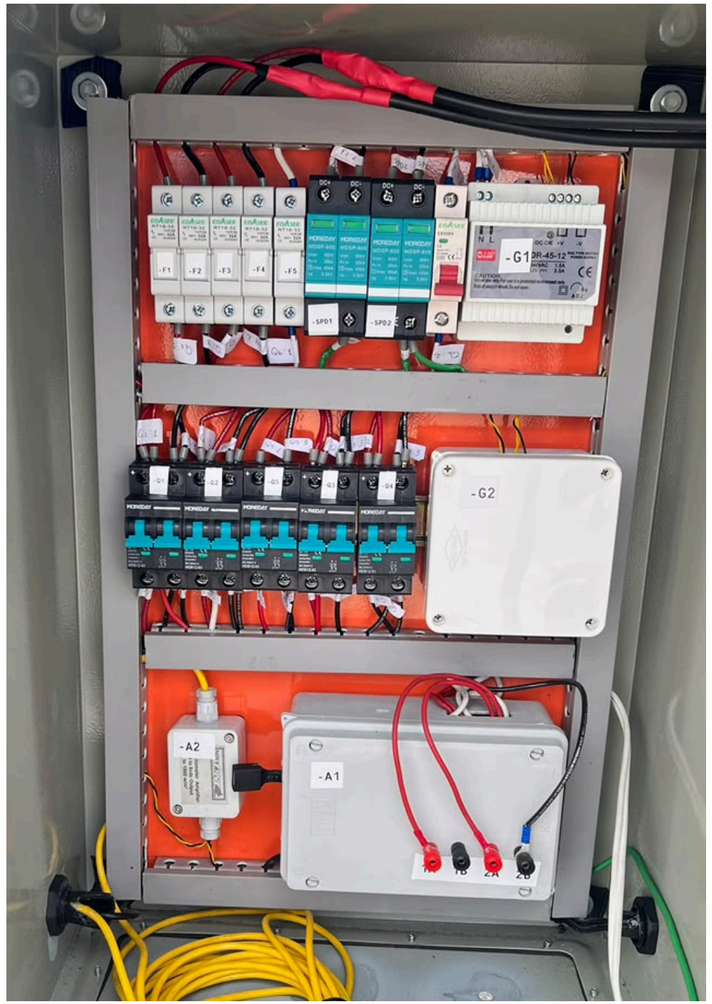
El diseño modular permite evaluar paneles en configuración individual, serie o paralelo sin modificar el cableado de potencia, garantizando repetibilidad y seguridad.

Sistema eléctrico de potencia y conmutación

Configuraciones de conexión de paneles fotovoltaicos

Parte Tablero y Sistema Fotovoltaico

- **IEC 60204-1:** Requisitos de seguridad para equipos eléctricos industriales: protección contra sobrecorriente, puesta a tierra e identificación de circuitos.
- **IEC 62548:** Diseño eléctrico de sistemas fotovoltaicos, selección de conductores y protección contra sobrecorriente y fallas.
- **IEC 60364-7-712:** Requisitos para instalaciones fotovoltaicas de baja tensión, incluyendo DPS (protección contra sobretensiones), seccionamiento (breakers) y puesta a tierra.
- **IEC 60898-2:** Define el comportamiento de interruptores automáticos para operación en DC. Es tu mejor defensa para justificar el uso de un breaker de 16A en paneles de 4A: "Se prioriza la capacidad de extinción de arco bajo norma IEC 60898-2 sobre el ajuste fino de la corriente nominal".
- **UL 2579:** Norma específica para **fusibles fotovoltaicos**. Al citarla, justificas que tus fusibles de 15A son de "grado solar" y están diseñados para proteger contra fallas de corriente inversa en arreglos de paneles, algo que un fusible común no hace.
- **NTC 2050 / NEC 690:** Aunque son reglamentos (Colombia/EE.UU.), son la base de la **IEC 62548**. Establecen que en sistemas de pequeña potencia, los conductores y protecciones pueden dimensionarse según la disponibilidad comercial siempre que el cable sea protegido por la ampolla de la protección.

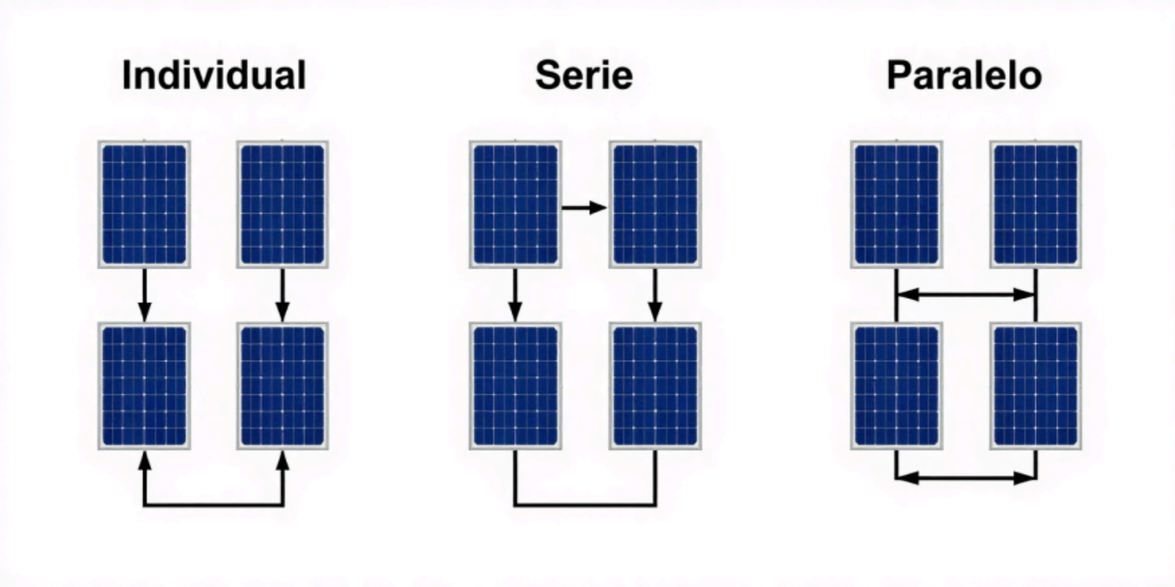


Una misma plataforma, tres configuraciones eléctricas de ensayo.

El diseño modular permite evaluar paneles en configuración individual, serie o paralelo sin modificar el cableado de potencia, garantizando repetibilidad y seguridad.

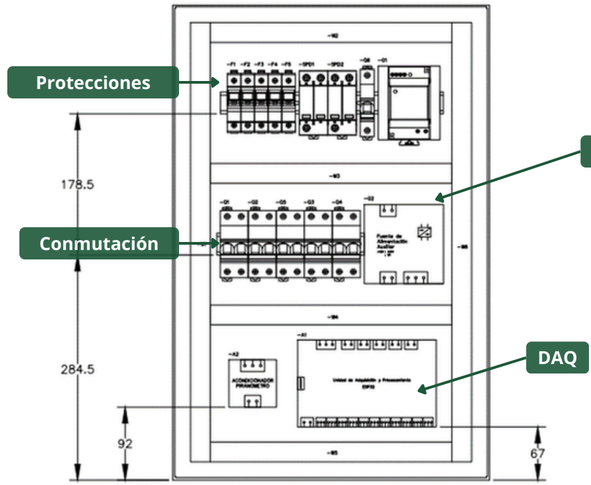
Sistema eléctrico de potencia y conmutación

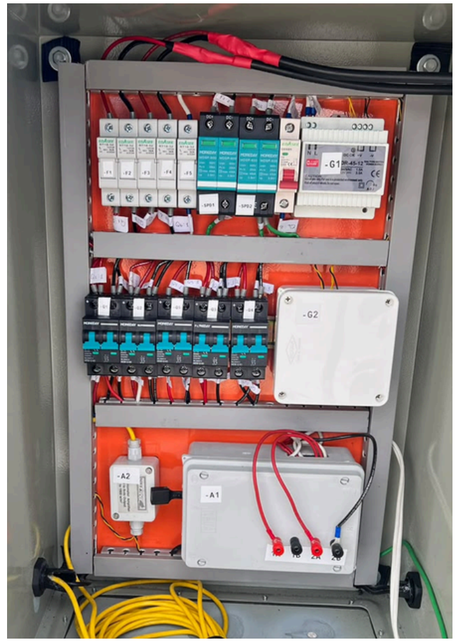
Configuraciones de conexión de paneles fotovoltaicos



Individual **Serie** **Paralelo**

Paneles FV → Protecciones → Conmutación → Reóstatos → Sistema de medición



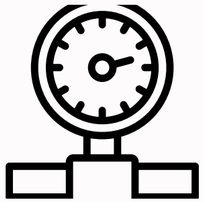


Una misma plataforma, tres configuraciones eléctricas de ensayo.

Voltaje máx. circuito abierto	85 V DC
	18 A
Corriente máx. cortocircuito	Fusibles + DPS clase
Protecciones	Contactores AC/DC

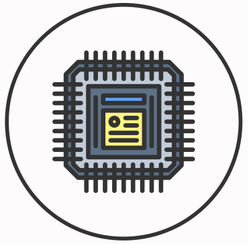
El diseño modular permite evaluar paneles en configuración individual, serie o paralelo sin modificar el cableado de potencia, garantizando repetibilidad y seguridad.

ETAPA 2. INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN



Instrumentación multivariable

Medición simultánea de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia mediante sensores integrados en ambos paneles.



Adquisición y digitalización

El ADS1115 convierte las señales analógicas y el ESP32 centraliza y procesa los datos del sistema.



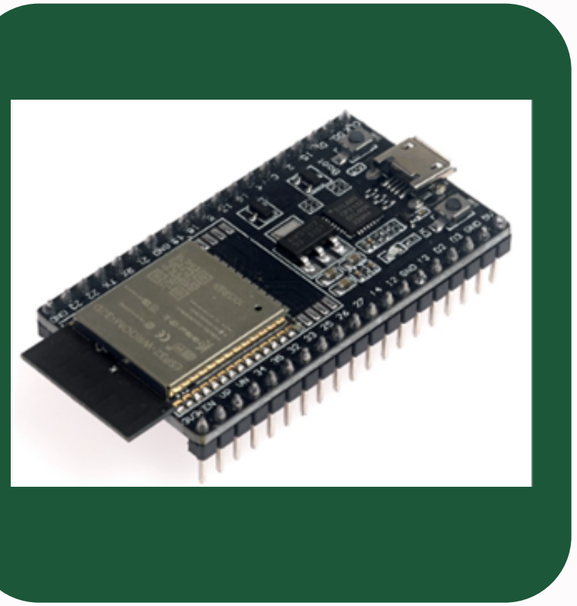
Transmisión de datos

El sistema envía 16 variables cada 2 segundos hacia la HMI mediante comunicación UART/USB.

Adquisición de datos

Variables medidas por el sistema de instrumentación

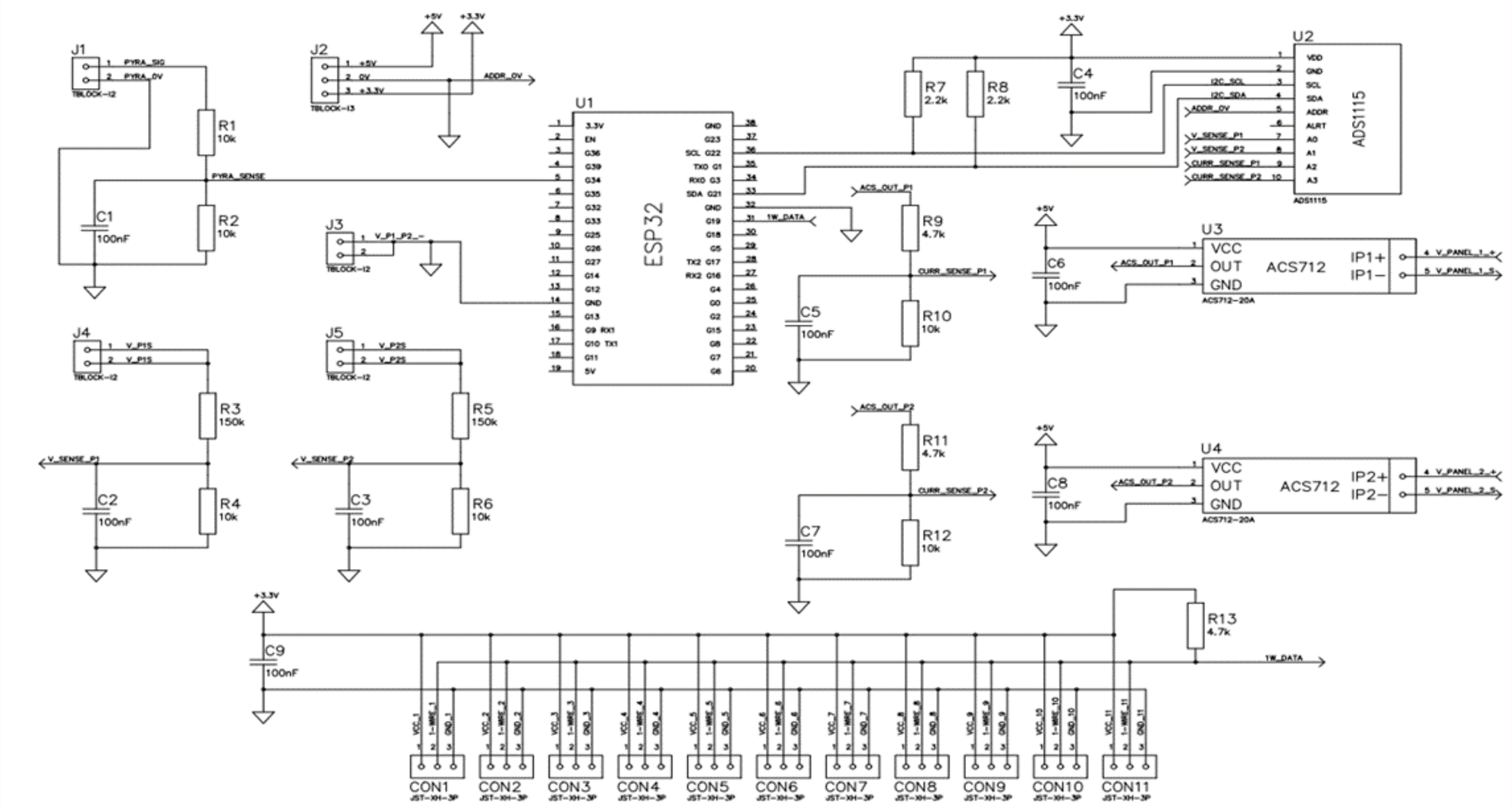
Variable	Sensor o circuito	Tipo de señal	Sistema de lectura
Voltaje FV	Divisor resistivo + filtro	Analógica	ADS1115
Corriente FV	ACS712-20A	Analógica	ADS1115
Temperatura	DS18B20	Digital	ESP32
Irradiancia	NOVA 240-CMP3 + acondicionador	Analógica acondicionada	ADC interno ESP32



Elementos principales del sistema DAQ

Elemento	Función
ESP32	Sección central de adquisición y comunicación
ADS1115	Conversión analógica-digital de alta resolución.
ACS712-20A	Valoración de corriente.
Divisores resistivos	Transformación de voltaje.
DS18B20	Medición de temperatura.
Piranómetro + acondicionador	Medición de irradiación.
UART/USB	Comunicación con el HMI.

Esquema electrónico DAQ



Calibración del sistema de medición

🌡️ **Temperatura**
Sensores DS18B20

Descripción:
Se calibraron **11** sensores mediante comparación en **tres** puntos de temperatura y regresión lineal individual.

Resultado:
El error máximo quedó por debajo de **0,175 °C** en **10** sensores; el sensor Panel **1–C3** presentó **0,813 °C**, dentro del criterio de aceptación de **±1 °C**.

⚡ **Voltaje**
Canales de voltaje

Descripción:
Los canales **A0** y **A1** del ADS1115 se calibraron en **11** puntos entre **0** y **30 V**, comparando las lecturas con un instrumento patrón.

Resultado:
Las ecuaciones de corrección compensaron pequeñas desviaciones de ganancia y offset, obteniéndose lecturas residuales cercanas a cero: **−0,003 V** y **−0,001 V**.

🔌 **Corriente**
Sensores ACS712

Descripción:
Los canales **A2** y **A3** se calibraron desde **0** hasta **6 A**, determinando individualmente la ganancia y el desplazamiento de cada sensor.

Resultado:
La corrección permitió compensar el offset característico de los ACS712, reduciendo las lecturas residuales a **0,058 A** y **0,045 A** en ausencia de corriente.

☀️ **Irradiancia solar**
Piranómetro NovaLynx CMP3

Descripción:
Se realizó una comparación en campo con un piranómetro Apogee MP-200, utilizando **1081** pares de mediciones sincronizadas.

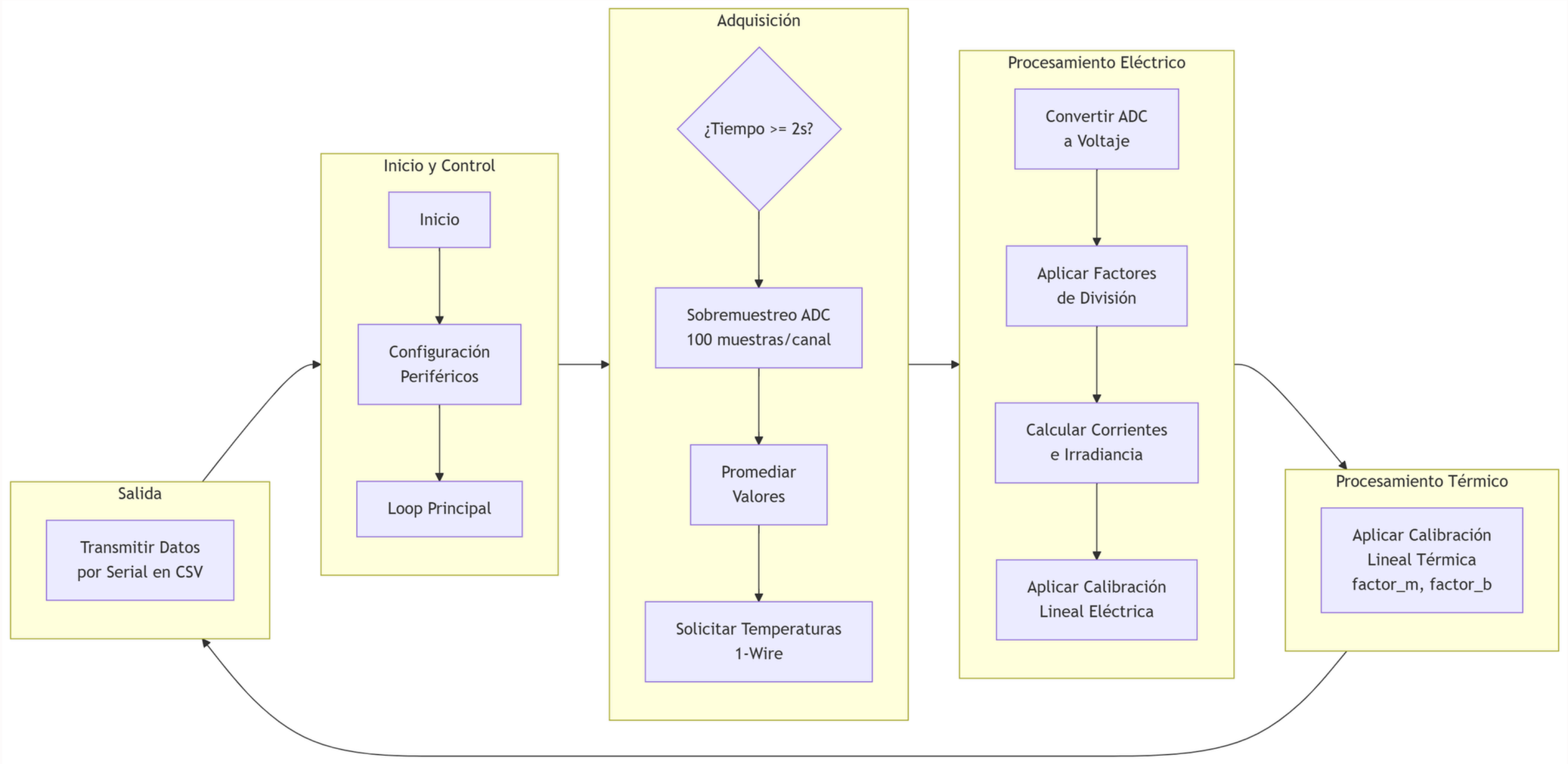
Resultado:
La ecuación de corrección redujo el RMSE de **96,75** a **63,55 W/m²**, equivalente a una disminución del error de **34,31 %**, con un **R² de 0,926**.

ESP32

De la lectura cruda a una medición corregida y confiable

HMI

Flujo principal de trabajo DAQ ESP32



ETAPA 3. PROCESAMIENTO Y VISUALIZACIÓN



Recepción y procesamiento

La HMI recibe las 16 variables enviadas por el ESP32, valida cada trama y convierte los datos en magnitudes eléctricas, térmicas y ambientales.



Visualización en tiempo real

La interfaz muestra voltaje, corriente, potencia, irradiancia y temperatura, además de generar las curvas I-V y P-V durante el ensayo.



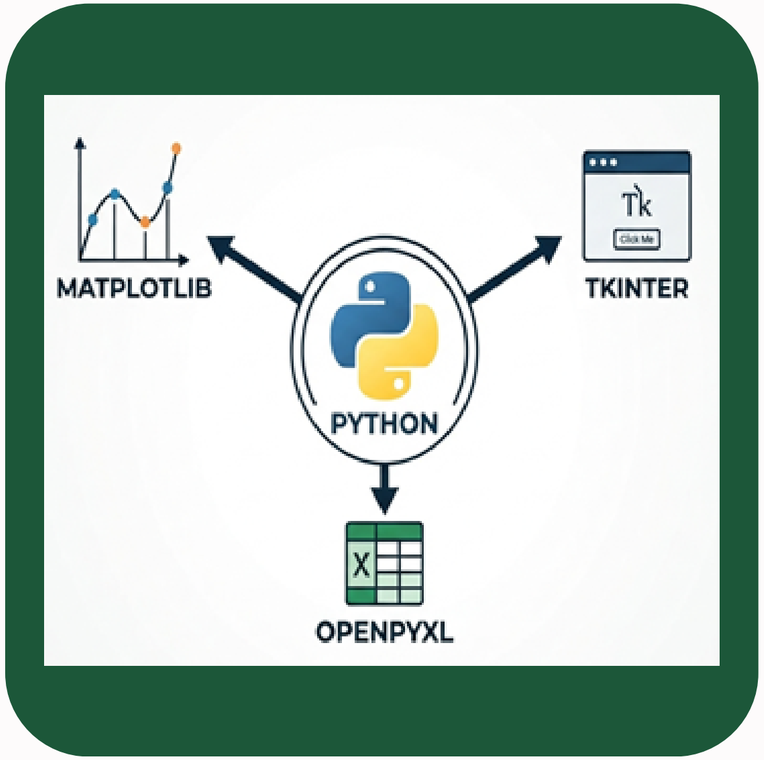
Registro y trazabilidad

Los datos medidos y calculados se almacenan automáticamente en archivos Excel con marca de tiempo y configuración de prueba.

Interfaz de usuario HMI

Requerimientos principales del software HMI

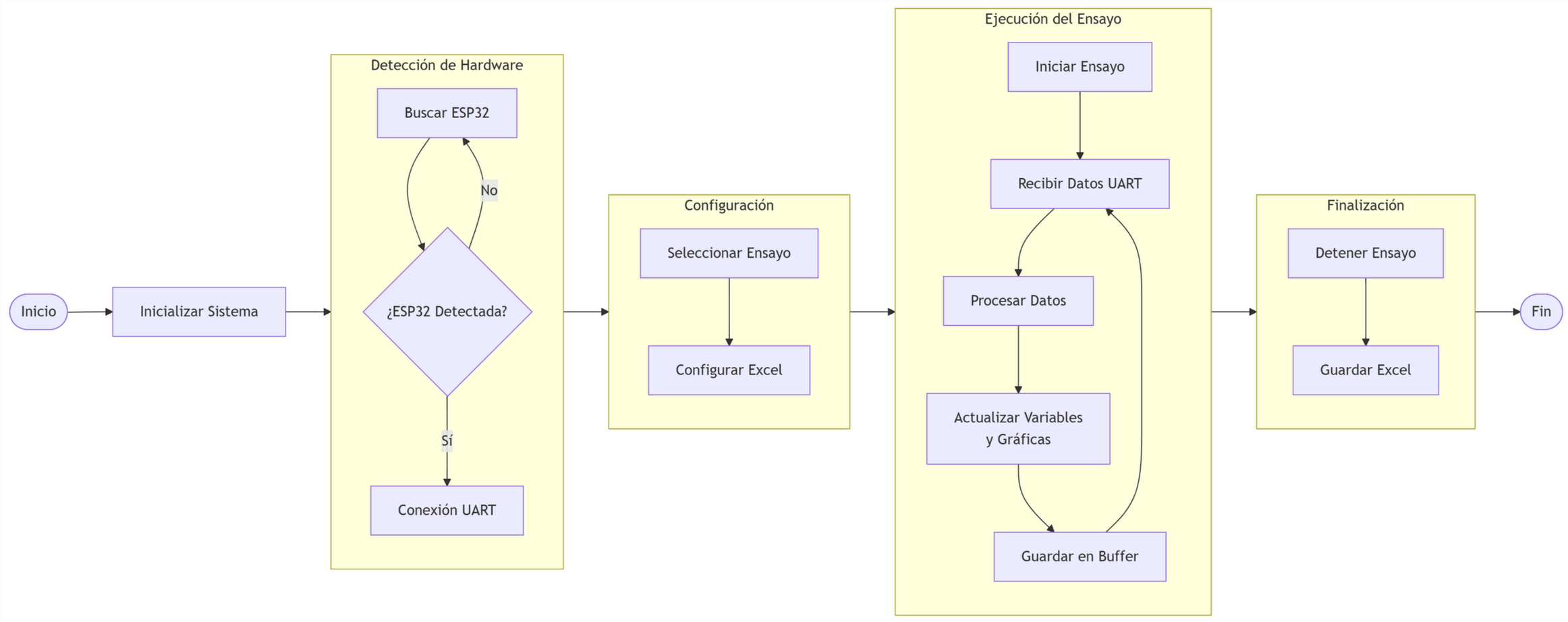
Módulo	Función principal
Interfaz visual.	Permite interacción entre operador y el banco.
Transmisión en serie.	Recibe información enviada por el ESP32.
Diccionario Informático.	Calcule los parámetros y la potencia fotovoltaicos.
Representación gráfica.	Elaboración en tiempo real de curvas I-V y P-V.
Almacenamiento.	Almacena la información experimental en Excel.



Principales herramientas Python

Librería / Módulo	Funcionalidad en el Sistema
CustomTkinter	Generación de la interfaz gráfica de usuario con diseño modular avanzado y gestión de eventos en tiempo de ejecución.
Matplotlib	Renderizado y trazado dinámico de las curvas características I-V y P-V del arreglo fotovoltaico.
OpenPyXL	Manipulación, almacenamiento y exportación automatizada de los registros experimentales a planillas de cálculo Excel.

Flujo de trabajo del HMI



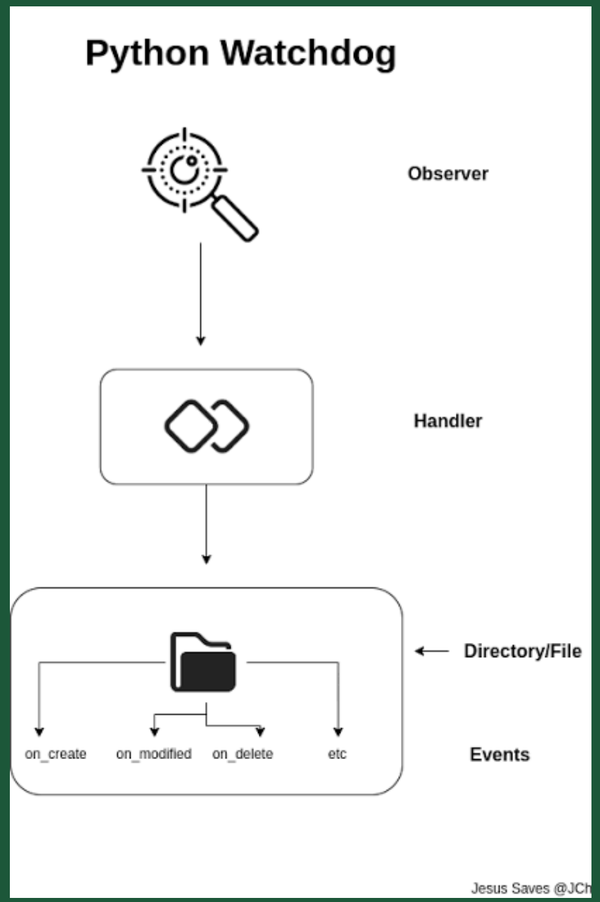
Datos almacenados

Dato registrado	Descripción
Hora de medición	Marca temporal del registro
Voltaje	Tensión medida en el panel
Corriente	Corriente entregada por el panel
Potencia	Producto entre voltaje y corriente
Irradiancia	Radiación solar medida por el piranómetro
Temperatura	Temperaturas registradas por sensores DS18B20
Configuración	Modo de conexión utilizado en el ensayo

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
58	--- ADQUISICIÓN DE CURVAS I-V Y P-V ---																	
59	Hora [HH:I	Voltaje Pa	Voltaje Pa	Corriente I	Corriente I	Radiación	Temp Exte	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Pane	Temp Panel 2 P5 [°C]	
60	10:05:58	0.533	0.459	2.677	2.608	569.199	23.53	44.137	43.82	44.63	48.621	47.779	44.957	42.296	44.492	47.477	47.261	
61	10:06:01	0.313	4.342	2.684	2.585	567.885	23.53	44.137	43.948	44.63	48.749	47.779	45.085	42.296	44.492	47.477	47.261	
62	10:06:03	1.376	5.982	2.662	2.578	567.351	23.53	44.137	43.948	44.764	48.749	47.907	45.085	42.296	44.492	47.477	47.261	
63	10:06:05	2.137	8.431	2.655	2.555	567.721	23.53	44.137	43.948	44.764	48.749	47.907	45.085	42.296	44.492	47.477	47.261	
64	10:06:06	3.421	9.621	2.651	2.529	567.351	23.53	44.137	43.948	44.764	48.749	47.907	45.085	42.296	44.62	47.477	47.261	
65	10:06:08	4.472	10.02	2.646	2.516	566.653	23.658	44.265	43.948	44.764	48.749	47.907	45.085	42.424	44.62	47.477	47.389	

Medidas de seguridad

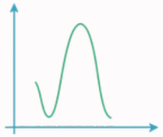
Riesgo	Medida aplicada
Trama incompleta	Validación de longitud de datos
Desconexión serial	Manejo de excepciones
Interfaz congelada	Ciclo de lectura no bloqueante
Mezcla de ensayos	Limpieza de buffers al reiniciar
Archivo Excel abierto	Advertencia antes del guardado
Pérdida de datos	Almacenamiento temporal en memoria



ETAPA 4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

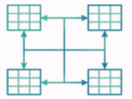
Pruebas funcionales

Se verificaron la alimentación eléctrica, las protecciones, la comunicación ESP32–HMI, la lectura simultánea de sensores y el almacenamiento de datos durante tres jornadas de ensayo.



Curvas I-V y P-V

Mediante el barrido manual con reóstatos se obtuvieron las curvas características de cada panel, identificando los parámetros Voc, Isc, Vmp, Imp y Pmax.



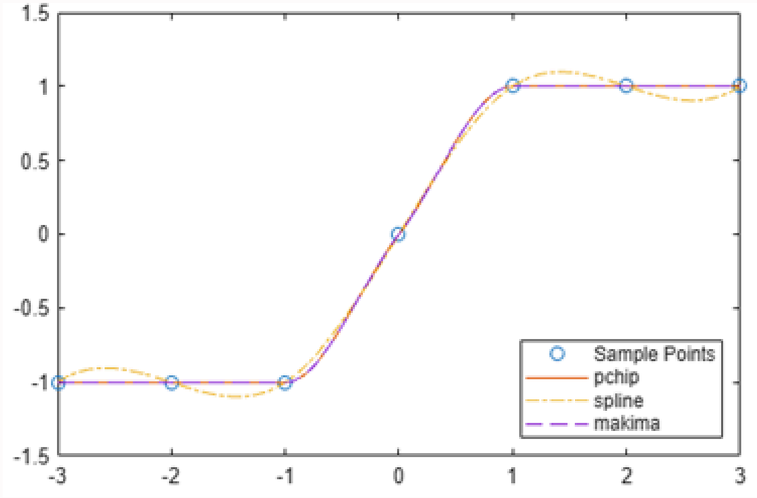
Evaluación de configuraciones

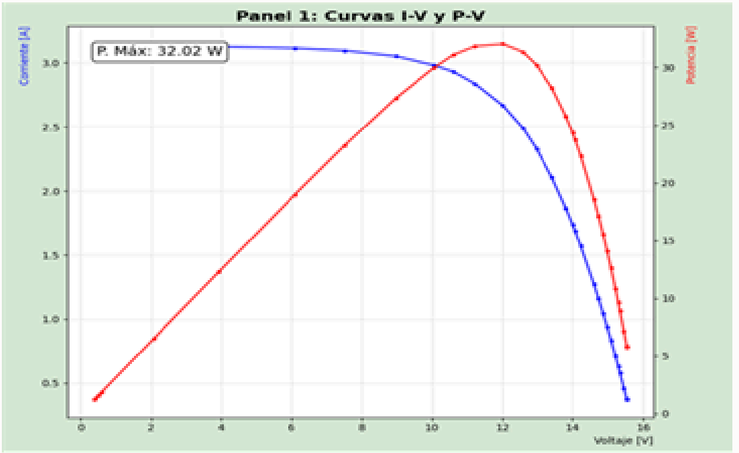
Se analizaron los modos individual, serie y paralelo. La conexión serie incrementó el voltaje y la conexión paralelo aumentó la corriente, con diferencias promedio de 0,340 % y 1,461 %, respectivamente.

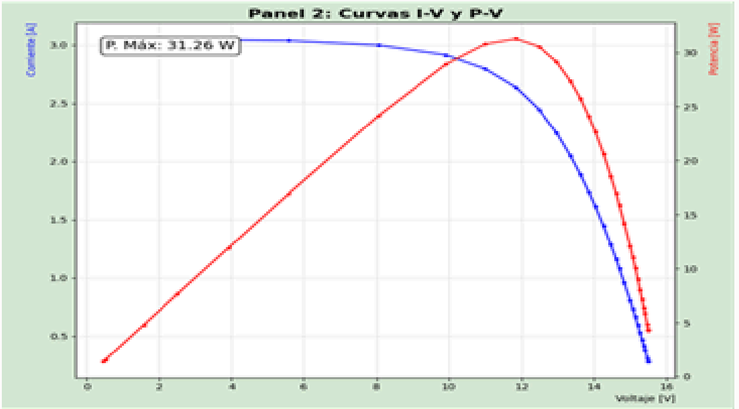
Obtención de curvas características I-V y P-V

Condiciones experimentales y procesamiento de datos

Item	Descripción
Entorno / Hora	Outdoor, cielo despejado, 12:00 PM (mediodía solar)
Ángulo	15° fijo
Reposo previo	10 min (equilibrio térmico)
Secuencia	① Medir Voc → ② Barrido manual con reóstatos → ③ Cortocircuito (Isc)
Almacenamiento	Datos registrados durante todo el barrido
Iteraciones	5 barridos por panel (2 paneles = 10 curvas)
Interpolación	PCHIP (monotonicidad garantizada, evita oscilaciones)

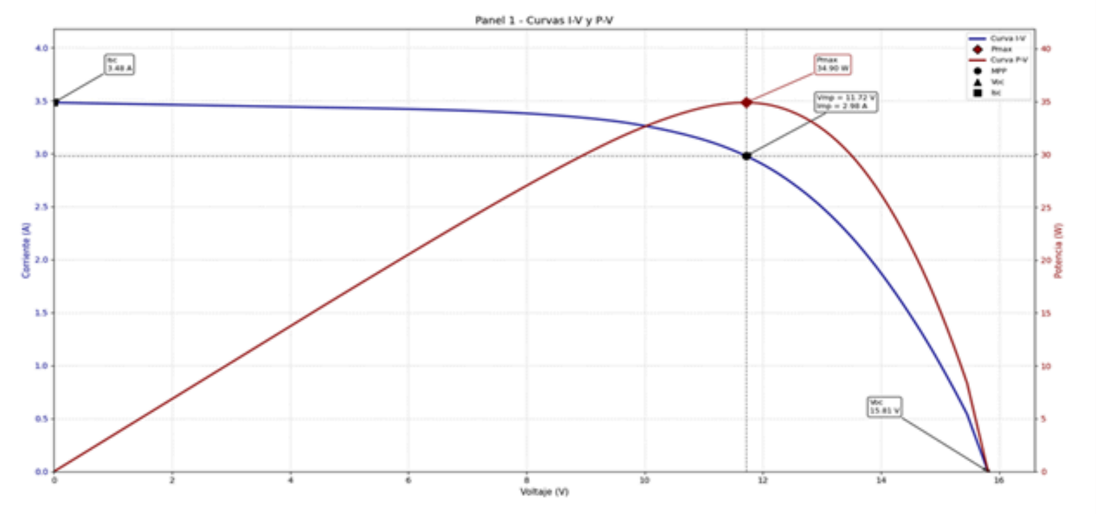


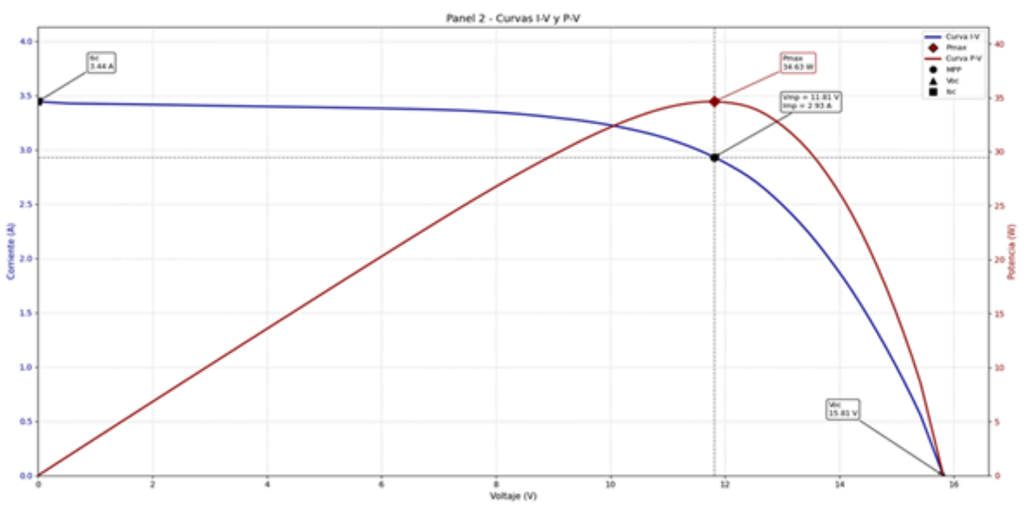




Resultados experimentales Panel 1 y Panel 2

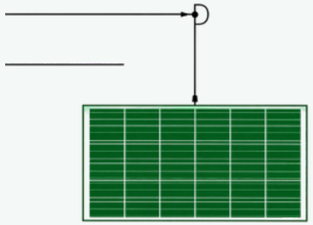
Parámetro	Panel 1	Panel 2
Pmax (W)	34,90	34,63
Vmp (V)	11,72	11,81
Imp (A)	2,98	2,93
Voc (V)	15,81	15,81
Isc (A)	3,48	34,40
FF (%)	63,38	63,60
Eficiencia (%)	13,45	13,35





Evaluación de configuraciones: Individual, Serie y Paralelo

Individual

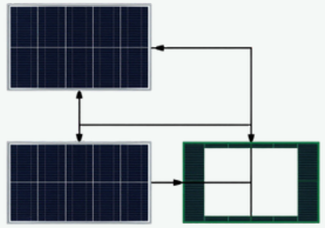


$Pmax_1$ = 39,884 W
$Pmax_2$ = 39,110 W

Operación independiente de cada panel

Cada panel se evaluó de manera independiente mediante barrido de carga, permitiendo obtener sus curvas I-V y P-V y determinar la potencia máxima de cada módulo.

Serie

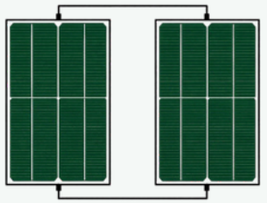


Voltaje aumenta (V_1+V_2)
Diferencia exp: 0,340 %

Suma de voltajes con corriente constante

La conexión en serie incrementó el voltaje total del arreglo, manteniendo la corriente limitada por el panel de menor respuesta. La diferencia promedio fue de 0,340 %.

Paralelo



Corriente aumenta (I_1+I_2)
Diferencia exp: 1,461 %

Suma de corrientes con voltaje constante

La conexión en paralelo aumentó la corriente total, manteniendo un nivel de voltaje similar al de un solo módulo. La diferencia promedio fue de 1,461 %.

Los resultados experimentales confirmaron el comportamiento eléctrico esperado en las tres configuraciones

Resultados y discusión

La estructura principal alcanzó un factor de seguridad de 2,265, con una tensión máxima de 91,385 MPa, inferior al límite elástico del acero galvanizado.

Estructura segura

Las ecuaciones de corrección redujeron los errores de temperatura, voltaje, corriente e irradiancia. En el piranómetro, el RMSE disminuyó un 34,31 %.

Sistema calibrado

El banco permitió obtener curvas I-V y P-V e identificar los parámetros Voc, Isc, Vmp, Imp y Pmax de cada módulo.

Curvas experimentales

En serie, el voltaje presentó una diferencia promedio de 0,340 %; en paralelo, la corriente difirió 1,461 % respecto a los valores teóricos esperados.

Validación de configuraciones

CONCLUSIONES



Integración mecatrónica lograda

Se diseñó y construyó un banco funcional que integra estructura mecánica, sistema eléctrico, instrumentación, adquisición de datos y una HMI para la caracterización de dos paneles fotovoltaicos.



Medición y procesamiento confiables

La calibración individual de los sensores y canales de medición permitió reducir los errores y trabajar con valores corregidos de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia.



Validación experimental satisfactoria

El banco permitió generar curvas I-V y P-V y comprobar el comportamiento esperado en las configuraciones individual, serie y paralelo, confirmando el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

MUCHAS GRACIAS

