Diseño y construcción de un banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos del laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables.

Camacho Polanco, Mairalys Paola y Pilataxi Constante, Luis Jairo

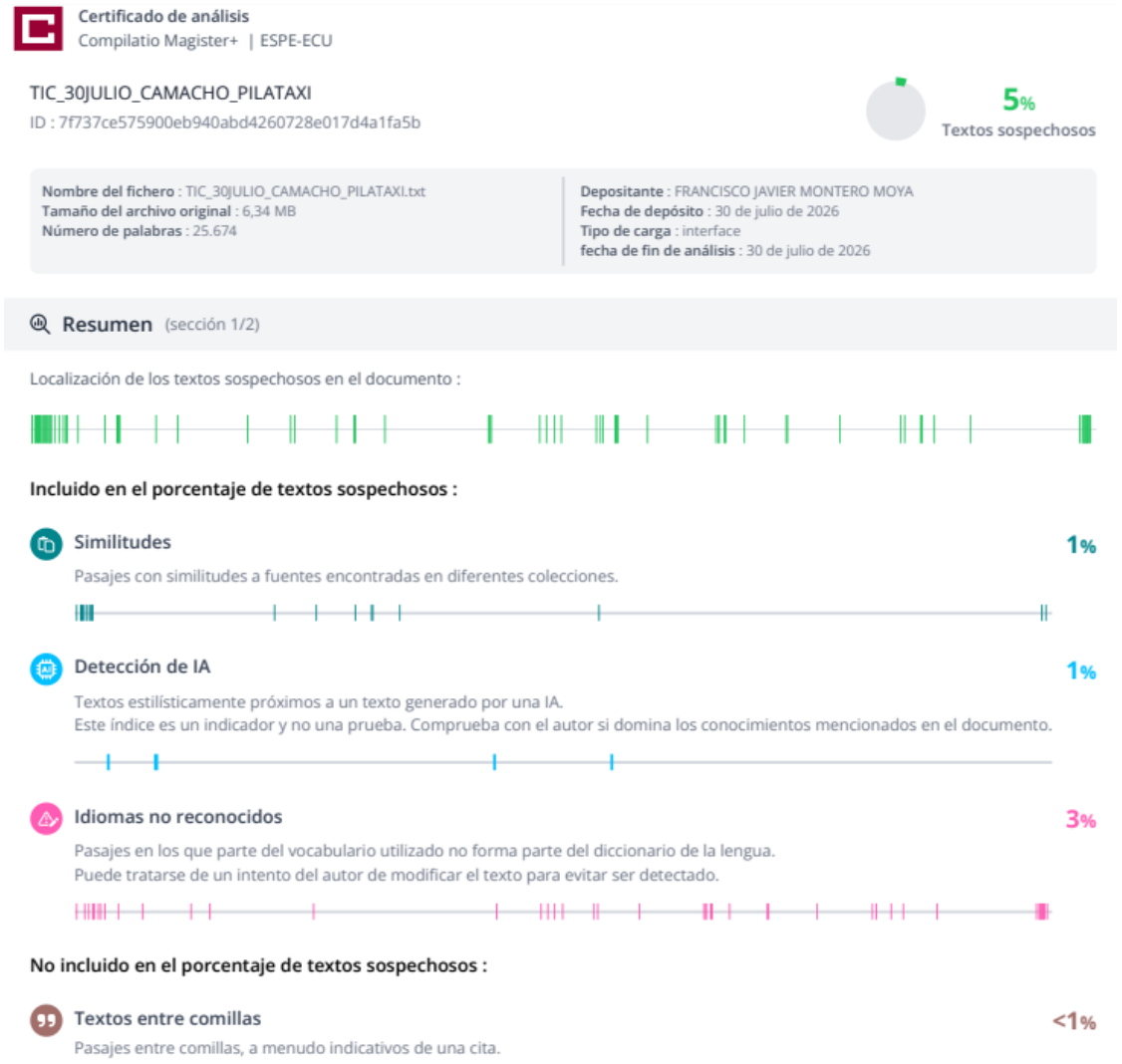
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Montero Moya, Francisco Javier

30 de julio de 2026



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

TIC_30JULIO_CAMACHO_PILATAXI
ID : 7f737ce575900eb940abd4260728e017d4a1fa5b

5%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TIC_30JULIO_CAMACHO_PILATAXI.txt
Tamaño del archivo original : 6,34 MB
Número de palabras : 25.674

Depositante : FRANCISCO JAVIER MONTERO MOYA
Fecha de depósito : 30 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 30 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :

Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 1%
Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.

Detección de IA 1%
Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.

Idiomas no reconocidos 3%
Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.

No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas <1%
Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO JAVIER MONTERO MOYA

Ing. Montero Moya, Francisco Javier

Director

C.C.: 1716756687

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Diseño y construcción de un banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos del laboratorio de conversión de la energía y energías sustentables.**" fue realizado por los señores **Camacho Polanco Mairalys Paola y Pilataxi Constante Luis Jairo,** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de Julio de 2026

.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO JAVIER MONTERO MOYA

Ing. Montero Moya, Francisco Javier

Director

C.C.: 171675668

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Camacho Polanco, Mairalys Paola y Pilataxi Constante, Luis Jairo** con cédulas de ciudadanía N°1758551483, y N°1729128965 respectivamente declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Diseño y construcción de un banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos del laboratorio de conversión de la energía y energías sustentables,** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de julio de 2026

Camacho Polanco, Mairalys Camacho

C.C.: 1758551483

Pilataxi Constante, Luis Jairo

C.C.: 1729128965

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros **Camacho Polanco, Mairalys Paola y Pilataxi Constante, Luis Jairo**, con cédulas de ciudadanía N°1758551483 y °1729128965 respectivamente, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Título: Diseño y construcción de un banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos del laboratorio de conversión de la energía y energías sustentables**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 30 de julio de 2026

Camacho Polanco, Mairalys Paola

C.C.: 1758551483

Pilataxi Constante, Luis Jairo

C.C.: 1729128965

Dedicatoria

Dedico este logro, de manera muy especial, a quienes han sido mi fuente inagotable de motivación diaria; las personas que me dieron la fortaleza para perseverar ante el cansancio y no detenerme hasta alcanzar esta meta.

A mi padre, Raúl Alfonso Camacho Marín, a quien debo gran parte de la persona que soy; porque con su propio ejemplo de superación, sumado a la confianza absoluta que tiene en mí y en mis capacidades, me ha enseñado a creer firmemente que nada es imposible.

A mi madre, Maigualida Polanco Fajardo, mi mayor referente de mujer tenaz, inteligente y llena de amor; por su hermosa capacidad de iluminar invariablemente hasta los días más grises con su sonrisa.

A mi hermano, Raúl Vicente Camacho Polanco, por ser un joven excepcionalmente maduro, protector y brillante; por las grandes enseñanzas que me ha brindado a su corta edad y por hacerme inmensamente feliz desde su nacimiento.

A mi familia en Venezuela, que a pesar de la distancia ha permanecido siempre atenta con mensajes de motivación y aliento. A mis queridas abuelas Carmen Marin, Nelly Marin, Julene Marin, Leonor Marin, a mi abuelo Hermes Raúl Camacho, y a mi dulce angelito del cielo, mi abuela Irma Polanco. Así mismo, a mi hermana Ysora Trompiz junto a mi sobrino Julián Arturo, por ser mi refugio constante y mi ancla de amor hacia mi ciudad natal, Punto Fijo.

A mi perrita Hera, mi fiel compañerita, por su amor sincero y por no separarse de mi lado durante cada madrugada de esta exigente etapa.

A mi novio, Carlos Andrés Jumbo Castillo, por llegar a mi vida para quedarse, y por acompañarme en este recorrido con paciencia, entrega y un amor genuino.

A todos ustedes les dedico el fruto de este esfuerzo y de estos años de perseverancia; son el pilar fundamental de cada paso que me trajo hasta aquí, para consolidarme hoy como Ingeniera Mecatrónica.

Mairalys Paola Camacho Polanco

Dedicatoria

A mis padres, Luis Rafael Pilataxi Vela y Anita María Constante Sinchiguano. Gracias por el inmenso esfuerzo y sacrificio que hicieron a lo largo de todos estos años. Si hoy estoy culminando esta etapa, es porque ustedes se aseguraron de brindarme el respaldo necesario para salir adelante.

A mi hermana, la Mgtr. Diana Belén, y a mi hermano, el Ing. Nicolás Alexander. Gracias por ser un pilar indispensable en este camino. Cada vez que necesité ayuda o enfrenté dificultades en la carrera, me brindaron su apoyo. Gracias por estar siempre dispuestos a darme una mano y hacer que todo fuera más llevadero.

Este título no es un logro individual, es el reflejo de nuestro trabajo en equipo como familia. Gracias por creer en mí y por darme todo lo necesario para convertirme en ingeniero.

Luis Jairo Pilataxi Constante

Agradecimiento

Elevo mi más profunda gratitud a Dios primeramente, a él agradezco las bendiciones diarias, así como la sabiduría, la perseverancia y la fortaleza para no claudicar aún en los días en que esta meta parecía inalcanzable, fue su voluntad la que me sostuvo, permitiéndome estar hoy aquí para ver culminado este gran anhelo.

En el ámbito institucional, expreso mi reconocimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por brindarme una educación de excelencia que no solo forjó mis conocimientos técnicos y científicos, sino también mis bases éticas para el ejercicio profesional.

De igual manera, expreso mi más sincero agradecimiento a el Dr. Francisco Montero Moya, por la confianza para el desarrollo de este trabajo, su acertada dirección, su profundo conocimiento en el área de las energías renovables y su constante apoyo para que este proyecto alcance la excelencia técnica más allá de un simple requisito de grado, sus ideales han sido verdaderamente inspiradores y determinantes para mi proyección como profesional.

Asimismo, hago extensiva mi gratitud al Dr. Diego Arcos (ELEE), por su invaluable paciencia al compartir sus vastos conocimientos sobre paneles solares y por abrirnos las puertas de su laboratorio. En este mismo sentido, a la Mgtr. Alexandra Verdugo (DCEM), por el considerable tiempo dedicado a la asesoría técnica enfocada en la arquitectura electrónica y mecatrónica de nuestra investigación.

Al ing. Freddy Guamushig, laboratorista del DCEM, por su permanente acompañamiento, excelente disposición y oportuna orientación durante toda la fase práctica de esta tesis.

En el ámbito personal, agradezco profundamente a mis padres, el Dr. Raúl Camacho y la Dra. Maigualida Polanco, por su constante respaldo emocional y económico durante toda mi carrera, ambos son mi principal inspiración para convertirme en una profesional de excelencia, siguiendo su digno ejemplo, agradezco inmensamente la oportunidad que me brindaron y la

confianza depositada en mí, motivados por la certeza de que este esfuerzo se traduciría en un futuro próspero para nuestra familia.

Por su parte, a mi hermano, Raúl Vicente Camacho, le agradezco el valor de sus palabras, las cuales, aunque breves, poseen gran profundidad y siempre me invitan a reflexionar. Asimismo, destaco el apoyo de mi hermana, Dra. Ysora Trompiz, quien desde el primer día tuvo la plena certeza de que alcanzaría este objetivo; su convicción me transmitió una seguridad sólida, otorgándome el impulso necesario para avanzar incluso frente a mis propias dudas. A su vez, expreso una gratitud total hacia mis amistades, cuyo respaldo representó un pilar esencial para sobrellevar los desafíos de este camino, de manera particular, destaco un agradecimiento infinito hacia mi amiga de la infancia, Valeria Lugo, a quien reconozco especialmente porque, a pesar del tiempo y la distancia, me brindó su apoyo incondicional como una verdadera hermana justo en los momentos en que más lo necesité.

En este mismo sentido, quiero dejar constancia de mi infinita gratitud hacia mi pareja; Ing. Carlos Jumbo, a quien valoro profundamente por su amor, sus enseñanzas y la guía que me ha brindado, transmitiéndome siempre la importancia de la disciplina, la resiliencia, la inteligencia y el esfuerzo sostenido, le agradezco, sobre todo, por ser mi soporte más fuerte cada vez que estuve a punto de rendirme; su fe absoluta en mi potencial fue el pilar que me impidió abandonar este camino en los momentos más críticos, haciéndome ver todo lo que soy capaz de lograr. A él le extiendo este sincero reconocimiento por el excelente equipo que siempre hemos conformado.

A todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este proceso, les expreso mi sincero agradecimiento. Como cierre de esta etapa, reitero mi más profunda gratitud a Dios y a mi familia, quienes constituyen el pilar fundamental de mi formación, este logro académico es el reflejo de su guía, su respaldo constante y sus valores, siendo ellos los verdaderos cimientos de este triunfo profesional.

Mairalys Paola Camacho Polanco

Agradecimiento

Al Dr. Francisco Montero Moya, director de este proyecto y Jefe del Laboratorio de Conversión de Energía y Energías Sustentables del DCEM de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por su guía, confianza y permanente disposición. Agradezco sinceramente su gestión para facilitarnos el acceso a otros laboratorios, su iniciativa para conectarnos con los especialistas adecuados y su acompañamiento personal durante las etapas críticas, siempre velando por el éxito y la calidad de este trabajo.

Al Dr. Diego Arcos Avilés (ELEE), por su excelente predisposición y apertura para compartir sus conocimientos en tecnología fotovoltaica. Su paciencia para explicarnos la fundamentación teórica, su guía constante en las pruebas de laboratorio y su confianza al facilitarnos equipos especializados, fueron pilares indispensables para el desarrollo de esta investigación.

A la Mgtr. Alexandra Verdugo Cabrera (DCEM), por el tiempo y dedicación invertidos en la revisión de nuestra arquitectura electrónica. Gracias a sus explicaciones, consejos y constante disposición para resolver dudas, logramos pulir los diseños y garantizar la operatividad de toda la instrumentación.

Al Ing. Freddy Guamushig Cóndor, laboratorista del Laboratorio de Conversión de Energía y Energías Sustentables del DCEM, por su apoyo incondicional y acompañamiento durante todo el proceso constructivo. Agradezco profundamente su paciencia al instruirnos en el uso de herramientas, sus valiosos consejos para el ensamble mecánico y los acabados, y por estar siempre pendiente de nuestros avances. Su ayuda constante y genuino interés facilitaron enormemente la materialización de este banco.

A la empresa SolarPower Ecuador, por su apertura al brindarnos información clave sobre normativas de instalación y protecciones eléctricas, permitiéndonos alinear el proyecto con estándares reales de la industria.

Finalmente, a mis padres, Luis Rafael Pilataxi Vela y Anita María Constante Sinchiguano; a mi hermana, la Mgtr. Diana Belén Pilataxi Constante; y a mi hermano, el Ing. Nicolás Alexander Pilataxi Constante. Este proyecto fue posible gracias a su esfuerzo familiar y financiamiento. Su respaldo incondicional me brindó la tranquilidad necesaria para enfocarme en mis objetivos y culminar mi carrera en Ingeniería Mecatrónica.

Luis Jairo Pilataxi Constante

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación....3
Responsabilidad de Autoría....4
Dedicatoria....6
Dedicatoria....7
Agradecimiento....8
Agradecimiento....10
Resumen....19
Abstract....20
Capítulo I Generalidades....21
Antecedentes....21
Planteamiento del problema....26
Objetivos....28
Objetivo general....28
Objetivos específicos....28
Justificación....28
Alcance del proyecto....30
Capítulo II Marco teórico....32
Sistema fotovoltaico....32
Energía solar fotovoltaica....32
Condiciones estándar de prueba (STC)....34
Temperatura de operación de la celda....34
Modelo eléctrico del panel fotovoltaico....35
Parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico en STC....35
Curva característica corriente-tensión (I-V)....36
Potencia máxima....37
Estructura de soporte de módulos fotovoltaicos....38
Factor de forma....39

Eficiencia del módulo 39
Irradiancia efectiva 40
Piranómetro 41
Ángulo de inclinación y orientación del panel 41
Configuraciones serie y paralelo 42
Sistema de adquisición de datos (DAQ) 43
Banco de ensayos 44
Capítulo III Metodología y diseño 44
Enfoque de investigación 44
Tipo y diseño de investigación 46
Metodología de diseño mecatrónico 46
Requerimientos 50
Diseño del sistema mecánico de la estructura 50
Configuración del análisis estático 50
Factor de Seguridad 52
Características generales del tablero 59
Configuraciones eléctricas del banco 60
Protecciones eléctricas 60
Selección de conductores 62
Distribución del tablero 63
Diseño del sistema de instrumentación y adquisición de datos 64
Variables medidas 64
Medición de voltaje 65
Medición de corriente 65
Medición de temperatura e irradiancia 66
Conversión analógica-digital y DAQ 66

Diseño del sistema de software HMI 67
Arquitectura general de la HMI.....67
Comunicación con el sistema DAQ.....68
Procesamiento de datos fotovoltaicos.....68
Visualización de curvas I-V y P-V 69
Almacenamiento de datos experimentales 70
Seguridad y confiabilidad del software.....71
Capítulo IV Resultados.....72
Validación experimental del banco de ensayos. 72
Resultados de calibración del sistema de medición.....73
Calibración de sensores de temperatura DS18B20 74
Calibración del sistema de medición de voltaje 79
Calibración del sistema de medición de corriente.....81
Calibración del piranómetro NovaLynx CMP3 82
Implementación de ecuaciones de corrección en el sistema DAQ.....84
Resultados de construcción e integración del banco 86
Construcción mecánica 87
Montaje eléctrico y tablero.....88
Integración del sistema DAQ 90
Implementación de la HMI 91
Pruebas funcionales del banco de ensayos.....93
Prueba de alimentación y protecciones 94
Prueba de comunicación ESP32-HMI.....95
Prueba de lectura de sensores.....96
Prueba en configuración individual.....99
Prueba en configuración serie 104
Prueba en configuración paralelo 106

Prueba de almacenamiento de datos 108
Obtención experimental de hoja de datos para paneles fotovoltaicos 109
Condiciones experimentales de ensayo y protocolo de adquisición 109
Procedimiento de barrido paramétrico 109
Procesamiento computacional de datos 110
Hojas de especificaciones experimentales (Datasheets) 111
Análisis técnico de la hoja de especificaciones experimentales (Datasheet) 111
Análisis general de resultados 113
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones 117
Conclusiones 117
Recomendaciones 119
Referencias 120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de antecedentes revisados.....25

Tabla 2 Variables principales consideradas en el banco de ensayos.....45

Tabla 3 Relación entre objetivos específicos y subsistemas del banco.....47

Tabla 4 Subsistemas principales del banco de ensayos fotovoltaico. 48

Tabla 5 Configuración general del análisis estático.....50

Tabla 6 Resumen de fuerzas externas aplicadas en la simulación 53

Tabla 7 Peso propio del modelo estructural 55

Tabla 8 Resultados principales del análisis estático.....55

Tabla 9 Resumen de cumplimiento del diseño mecánico.....57

Tabla 10 Características generales del sistema eléctrico del banco 59

Tabla 11 Configuraciones eléctricas del banco de ensayos.....60

Tabla 12 Protecciones seleccionadas para el sistema de potencia.....61

Tabla 13 Verificación de caída de tensión en conductores.....63

Tabla 14 Distribución interna del panel. 64

Tabla 15 Variables medidas por el sistema de instrumentación.....64

Tabla 16 Elementos principales del sistema DAQ.....66

Tabla 17 Componentes principales del software HMI. 67

Tabla 18 Datos almacenados por la HMI 70

Tabla 19 Medidas de confiabilidad implementadas en la HMI.....71

Tabla 20 Variables consideradas en el proceso de calibración 73

Tabla 21 Identificación de sensores DS18B20 calibrados.....74

Tabla 22 Promedios utilizados para la calibración de los sensores DS18B20.....76

Tabla 23. Ecuaciones de corrección obtenidas para los sensores DS18B20 77

Tabla 24 Comparación del error máximo antes y después de la calibración 78

Tabla 25 Ecuaciones de corrección para medición de voltaje 80

Tabla 26 Ecuaciones de corrección para medición de corriente 82

Tabla 27 Resultados de calibración comparativa del piranómetro NovaLynx CMP3.....83

Tabla 28 Ecuaciones implementadas en el sistema DAQ 85

Tabla 29 Subsistemas integrados en el banco de ensayos.....86

Tabla 30 Verificación de construcción mecánica del banco. 87

Tabla 31 Características eléctricas generales del tablero. 88

Tabla 32 Componentes principales instalados en el tablero.....89

Tabla 33 Integración de sensores y señales en el sistema DAQ.....90

Tabla 34 Pantallas implementadas en la HMI. 92

Tabla 35 Funciones principales implementadas en la HMI.....93

Tabla 36 Campañas experimentales ejecutadas para la validación funcional.....94

Tabla 37 Resultados de la verificación de las tensiones de alimentación. 95

Tabla 38 Medidas verificados durante la comunicación ESP32-HMI.....96

Tabla 39 Resultados representativos de la lectura integrada de sensores.....97

Tabla 40 Resultados máximos observados en la configuración individual 100

Tabla 41 Comparación entre los valores individuales y la configuración serie 104

Tabla 42 Comparación entre los valores individuales y la configuración paralelo 106

Tabla 43 Archivos generados durante las pruebas funcionales 108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto fotovoltaico dentro de una célula solar. 33

Figura 2 Curvas características I-V y P-V de un panel fotovoltaico 37

Figura 3 Resumen de resultados del análisis estático. 56

Figura 4. Condiciones ambientales y térmicas promedio durante las campañas experimentales. 98

Figura 5. Curva I-V del panel 1 en configuración individual, 14 de julio de 2026 101

Figura 6 Curva P-V del panel 1 en configuración individual, 14 de julio de 2026. 102

Figura 7. Potencia máxima registrada por fecha y módulo en configuración individual. 103

Figura 8 Comparación entre la suma de Voc individuales y el Voc medido en serie 105

Figura 9 Comparación entre la suma de Isc individuales y la Isc medida en paralelo. 107

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar y construir un banco de ensayos para la caracterización eléctrica, térmica y ambiental de paneles solares fotovoltaicos del Laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables. La metodología correspondió a una investigación aplicada, cuantitativa y experimental, orientada al desarrollo de un prototipo mecatrónico; los requerimientos se priorizaron mediante una matriz QFD y el proceso de diseño se organizó con base en la metodología VDI 2206. El banco permite la integración de cuatro subsistemas. Tiene una estructura mecánica para dos módulos ARCO de 43 W. La inclinación en el banco se puede regular entre 15° y 45° en pasos de 5°. Un sistema de instrumentación que permite medir el voltaje, corriente, irradiancia y temperatura. Un sistema de adquisición de datos, que consiste en un ESP32 y conversores ADS1115. HMI diseñada en Python, para la visualización, procesamiento y almacenamiento de la información. Los sensores de temperatura DS18B20, los canales de voltaje, los sensores de corriente ACS712-20A y el PIRANÓMETRO NOVA 240-CMP3 fueron calibrados antes de ser acoplados. La validación funcional se realizó en tres días en configuraciones, individual, serie y paralelo, y se generaron 18 archivos. En su configuración individual, las mayores potencias alcanzadas fueron 3.884 W para el panel 1 y de 39.110 W para el panel 2. El voltaje medido en serie, de media, diferencia un 0.340 % respecto de la suma de los voltajes individuales; asimismo, la corriente medida en paralelo mostró una diferencia promedio de 1.461 % respecto de la suma de las corrientes individuales. Se concluyó que la integración mecánica, electrónica y computacional permitió caracterizar los módulos, generar curvas I-V y P-V, y conservar los resultados experimentales para su posterior análisis.

Palabras clave: banco de ensayos fotovoltaico, caracterización fotovoltaica, adquisición de datos, instrumentación, curvas I-V.

Abstract

The objective of this study was to design and build a test bench for the electrical, thermal, and environmental characterization of photovoltaic solar panels at the Energy Conversion and Sustainable Energy Laboratory. The way we did things was by using practical, number-based, and trial research to build a working gadget. We decided what was most important by using a QFD chart, and we set up how we would build it following the VDI 2206 way of doing things. The setup for testing had four main parts. First, a metal frame held two ARCO parts that used 43 watts each, and you could change how tilted they were from 15 to 45 degrees, moving up by 5 degrees each time. Second, a way to measure things like electricity flow, brightness, and heat. Third, a system to collect the information, which used an ESP32 and ADS1115 converters. And fourth, a computer program made with Python to show, work with, and save the measurements. We made sure the DS18B20 temperature checkers, the electricity readers, the ACS712-20A current checkers, and the NOVA 240-CMP3 light meter were all accurate before we put them in. We checked if everything worked over three days of tests, trying out different ways to connect the parts: by themselves, one after another, and side by side. This gave us 18 files of information. When each part was tested alone, the most power we saw was 39.884 watts from the first one and 39.110 watts from the second one. The electricity reading when nothing was flowing in the one-after-another setup was different by about 0.340% on average compared with the sum of the individual voltages; similarly, the short-circuit current measured in the parallel configuration exhibited an average difference of 1.461% compared with the sum of the individual currents. It was concluded that the mechanical, electronic, and computational integration enabled the characterization of the photovoltaic modules, the generation of I-V and P-V curves, and the preservation of experimental results for subsequent analysis.

Key words: sun-powered bench, sun-powered testing, taking in data, measuring tools, voltage-current lines.

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

El deterioro progresivo del rendimiento de los módulos fotovoltaicos bajo condiciones reales de operación ha sido objeto de estudio sistemático en la literatura científica reciente. Alimi et al. realizaron una revisión de estado del arte sobre confiabilidad y degradación de módulos solares. Los autores encuentran que la temperatura, irradiancia acumulada y humedad influyen directamente en la eficiencia en el ciclo de vida del panel (Alimi et al., 2022). La medición periódica y controlada de parámetros eléctricos bajo condiciones definidas es el método más fiable para detectar pérdidas de rendimiento, y esta conclusión justifica directamente la necesidad de contar con una plataforma de ensayo dotada de instrumentación calibrada, como la que se desarrolla en el presente trabajo.

En el área de diseño de instrumentos para caracterización fotovoltaica, Sayyad y Nasikkar desarrollaron un trazador de curvas I-V portátil, de bajo costo y basado en carga capacitiva, para realizar mediciones en campo y sobre módulos en funcionamiento (Sayyad & Nasikkar, 2021). La metodología empleó un microcontrolador para la sincronización de la adquisición, así se realizó un sistema de medir potencia reactiva que utiliza un banco de condensadores como carga variable y comunicación serial hacia una interfaz de procesamiento, obteniendo una precisión similar a equipos comerciales de referencia, pero de bajo costo. La arquitectura propuesta por estos autores es directamente comparable a la del subsistema DAQ basado en ESP32 que se implementa en este proyecto, validando así la viabilidad técnica de la solución adoptada.

De Riso et al. diseñaron un trazador de curvas I-V portátil y de bajo costo destinado a la inspección en línea de módulos fotovoltaicos, publicado (De Riso et al., 2024). Este sistema estaba compuesto por electrónica de adquisición de señal, firmware embebido y visualización, permitiendo la caracterización de módulos bajo diferentes condiciones de irradiancia y con un

margen de error inferior al 2% respecto a un equipo certificado. Este trabajo aporta al presente proyecto un referente metodológico actualizado sobre integración de subsistemas de medición en plataformas compactas, particularmente en lo que respecta al acondicionamiento de señal y la calibración del circuito de medición de voltaje y corriente.

A nivel latinoamericano, el desarrollo de sistemas de adquisición de datos y plataformas El desarrollo de la tecnología de monitoreo para energía renovable ha avanzado considerablemente en universidades de la región y se pueden extraer recursos metodológicos aplicables a este trabajo. Entre los más destacados se encuentra Hurtado Rodríguez, quien desarrolló un prototipo de un sistema de adquisición de datos de temperatura y nivel de agua en tiempo real. Este sistema se encuentra aplicado a una planta de tratamiento de aguas residuales (Hurtado Rodríguez, 2020). Si bien el dominio de la aplicación es diferente al fotovoltaico, la investigación presentó los mismos retos de sincronización, acondicionamiento de señal y transmisión de datos que cualquier sistema DAQ multicanal. Los resultados validaron la arquitectura de microcontrolador con sensores analógicos y comunicación serial hacia interfase usuario. Este antecedente es relevante dado que demuestra que las soluciones de adquisición de datos basadas en hardware embebido de bajo costo resultan válidas para condiciones académicas con modesta relación coste-eficiencia con una alta tolerancia a error, situación que también se tiene en el banco de ensayo fotovoltaico aquí presentado.

Desde un marco regional y nacional, la investigativa en energía fotovoltaica en Ecuador ha ido adquiriendo terreno en los últimos años en las universidades técnicas del país, donde se han desarrollado trabajos que abordan desde el monitoreo de sistemas instalados, hasta el diseño de plataformas experimentales de laboratorio. Investigadores de la ESPOL diseñaron prueba de rendimiento y prueba de integridad estructural cuyo objetivo es dotar al laboratorio de energía renovable de esa entidad de equipos de caracterización experimental que hayan sido fabricados totalmente en el entorno universitario (Ortega & Urquizo, 2016). Las tareas consistieron en el diseño mecánico de las estructuras de soporte, la selección e integración de

los sensores térmicos y la validación del sistema por medio de ensayos comparativos, donde se vio que los bancos realizados son funcionales y sirven a las prácticas de laboratorio. Debido a que se realiza en el contexto ecuatoriano y trata sobre el diseño y construcción de un banco de ensayo para un sistema de energía renovable en un laboratorio universitario con limitaciones de recursos y espacio, se convierte en un trabajo relevante para la presente investigación.

Criollo Enríquez et al. analizaron la evolución tecnológica de la generación solar fotovoltaica, identificando las tendencias actuales, las cuales fueron publicadas en la Revista Tecnológica de la ESPOL en el área de sistemas de conversión, almacenamiento y monitoreo de energía solar a nivel global y regional. (Criollo Enríquez et al., 2024).El estudio evidencia un crecimiento acelerado en la adopción de sistemas fotovoltaicos distribuidos en América Latina, acompañado de una creciente demanda de profesionales con competencias experimentales en caracterización y operación de estos sistemas; precisamente esa brecha de formación práctica es la que justifica el desarrollo de la plataforma de ensayo propuesta en este trabajo.

En la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca se desarrolló en 2024, un sistema de monitoreo remoto de la irradiación solar global con base en parámetros eléctricos de paneles fotovoltaicos, integrando sensores, módulos de comunicación y una plataforma de visualización en tiempo real (Palacios & Tapia, 2024). Los resultados demostraron que la medición indirecta la utilización de irradiancia mediante parámetros eléctricos del panel es una opción viable y económica frente al uso exclusivo de piranómetros certificados; sin embargo, el estudio también evidenció las limitaciones de precisión de ese enfoque cuando no se cuenta con una estructura de soporte con ángulo de inclinación controlado, limitación que el banco de ensayo del presente trabajo resuelve mediante el mecanismo de ajuste angular de la estructura.

Espejo y Cruz implementaron en la PUCE un banco de pruebas fotovoltaico con y sin seguimiento solar, monitoreado desde una interfaz HMI, como parte del programa de Maestría

en Electricidad con mención en Energías Renovables (Espejo Y Subida & Cruz, 2022). La investigación evaluó el incremento en la captación de energía al incorporar seguimiento solar respecto a una estructura fija, usando una interfaz HMI desarrollada en software de supervisión En la investigación para la captura de datos en tiempo real y su visualización se encontró que la captación se incrementó hasta un 30% con el seguimiento de un eje. Este trabajo es el antecedente nacional más próximo al proyecto que se propone, por compartir tanto el objeto de estudio (el banco de pruebas fotovoltaico) como la solución de interfaz de usuario para el procesamiento y visualización de datos.

Holguín y Marcillo Parrales desarrollaron un banco de panel solar como fuente energética alternativa para el desarrollo de las prácticas del laboratorio de electrónica y robótica de la UNESUM. El proyecto integró paneles fotovoltaicos con un sistema de carga y una interfaz básica de monitoreo, cuyo objetivo fue permitir la realización de mediciones eléctricas y el aprendizaje referente a la conversión de energía proveniente del sol en un laboratorio de control (Holguìn Mantuano & Marcillo Parrales, 2025). La contribución de este trabajo a la presente investigación consiste en confirmar que la implementación de bancos de ensayo fotovoltaico en laboratorios universitarios ecuatorianos es técnicamente viable con recursos propios; no obstante, la ausencia de un sistema de adquisición de datos automatizado y de una interfaz de procesamiento avanzada en ese trabajo constituye precisamente el nivel de desarrollo que este proyecto busca superar.

A pesar del conjunto de trabajos revisados, ninguno aborda de forma integrada el diseño mecánico con ajuste de inclinación angular, la conmutación de configuraciones eléctricas mediante lógica cableada con disyuntores, la adquisición sincronizada multicanal y el. procesamiento en una aplicación HMI desarrollada en Python, todo orientado a las condiciones específicas del Laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables de la ESPE; ese vacío es el que fundamenta y justifica el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 1

Resumen de antecedentes revisados.

Autor(es) y año	Tema central	Metodología	Aporte a esta investigación
Alimi et al. (2022)	Confiabilidad y degradación de módulos FV	Revisión sistemática – Scopus.	Mide parámetros eléctricos periódicamente.
Sayyad & Nasikkar (2021)	Trazador de bajo costo portátil I-V.	Un diseño experimental con microcontrolador y carga capacitiva.	Comprobación de arquitectura de adquisición de datos con ESP32.
De Riso et al. (2024)	Trazador I-V portátil para el chequeo en línea.	Combinación de electrónica de captación y firmware empotrado.	Se refiere a sistemas de medición compactos.
Hurtado Rodríguez (2020)	Sistema DAQ para Estación de Depuración de Agua	Un microcontrolador que posee algunos sensores analógicos y que puede comunicarse por serial.	Arquitectura DAQ Tecnologías para la validación
Ortega et al. (2016)	Bancos de ensayo para captadores solares-fotovoltaicos	Diseño mecánico con sensores integrados y ensayos comparativos	Precedente nacional de universidades públicas y privadas como bancos de ensayo
Criollo Enríquez (2024)	Desarrollo de sistemas de energía solar	Estudio de literatura y desarrollo georreferenciado	Las evidencias avalan la necesidad de formar en Ecuador

Autor(es) y año	Tema central	Metodología	Aporte a esta investigación
De Electrónica et al. (2024)	Control de radiación solar UPS Cuenca	Medición indirecta a través de parámetros eléctricos mediante ESP32.	Se verifica con el ESP32; se evidenciada la necesidad de un control angular.
Espejo & Cruz (2022)	Banco FV con seguimiento solar y HMI - PUCE.	Una forma de diseño experimental que incluye la interfaz y comparativa de configuraciones.	El antecedente más inmediato sería el banco FV con HMI en Ecuador.
Mantuano Holguín et al. (2025)	Banco de panel solar en laboratorio — UNESUM	Integración de paneles, sistema de carga e interfaz básica	Confirma viabilidad; evidencia ausencia de DAQ automatizado

Nota. Elaboración propia

Planteamiento del problema

La creciente energía solar fotovoltaica ha sido una de las tecnologías que más ha crecido en la última década ya que ha habido una serie de políticas desde el nivel global que apuestan por estas energías ya no solo desde los gobiernos si no desde la sociedad misma. Debido a ello el sector se está viendo con una creciente necesidad de profesionales capacitados para evaluar, medir y analizar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de operación. Frente a tal situación, los laboratorios universitarios de energías renovables constituyen espacios clave de formación práctica, donde los estudiantes desarrollan las competencias experimentales demandadas por el sector productivo.

El Laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la ESPE está dotado de recursos básicos para el estudio de energía solar, tales como; dos paneles ARCO de 43 W, un piranómetro NOVA 240-CMP3, reóstatos de potencia, entre otros. Sin embargo, estos elementos se encuentran sin uso ya que no poseen una plataforma que los integre bajo un procedimiento definido ni una estructura que permita soportar y controlar el ángulo de inclinación de los paneles durante las mediciones.

Debido a que las medidas de estas variables se deben tomar con instrumentos independientes y sin sincronismo temporal para no influenciar el proceso experimental. La falta de un sistema automatizado también impide la obtención de la curva característica corriente-tensión del módulo, que es útil para la evaluación de su comportamiento eléctrico, así como para determinar el voltaje de circuito abierto, la corriente de cortocircuito y el punto de máxima potencia. Por consiguiente, se requiere una plataforma que integre la estructura de soporte, la instrumentación, la adquisición sincronizada y el procesamiento de los datos experimentales.

A pesar de que existen soluciones desarrolladas en otras universidades del país que demuestran la viabilidad de implementar bancos de prueba fotovoltaicos en entornos académicos con recursos propios, el DCEM de la ESPE carece de una herramienta que integre estructura mecánica con ajuste angular, conmutación de configuraciones eléctricas, adquisición sincronizada de datos y procesamiento mediante interfaz gráfica. En consecuencia, el problema Se establece que actualmente no existe ningún medio en el laboratorio que permita al estudiante obtener, registrar y analizar, en un único lugar, los parámetros eléctricos y ambientales de paneles solares para una actividad de ensayo integrada, reproducible y bajo norma técnica internacional, en el laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables de la ESPE.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos del laboratorio de conversión de la energía y energías sustentables.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir la estructura de soporte con variación de inclinación para dos paneles solares fotovoltaicos
- Implementar la instrumentación necesaria en el banco de pruebas incluyendo piranómetro, voltímetro, amperímetro, reóstatos y sensores de temperatura
- Diseñar y construir un sistema de adquisición de datos para parámetros eléctricos y térmicos del banco de ensayos para mediciones en paneles solares fotovoltaicos
- 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

Justificación

La caracterización experimental de módulos fotovoltaicos constituye una competencia técnica fundamental en la formación de ingenieros que trabajarán en el diseño, evaluación y operación de sistemas de energía renovable, desde el punto de vista teórico, este proyecto contribuye al conocimiento aplicado en el área al generar un procedimiento experimental documentado, reproducible y alineado con la norma IEC 61853-1:2011, que establece los criterios internacionales para la medición del rendimiento de módulos fotovoltaicos. Este procedimiento, junto con los datos obtenidos durante la validación del banco, llena un vacío concreto en la producción académica del DCEM: hasta la fecha no existe, dentro del departamento, un protocolo experimental propio para la obtención de curvas I-V en condiciones reales con los recursos disponibles en el laboratorio.

Desde una perspectiva práctica, el banco de ensayos desarrollado permitirá obtener la curva característica de dos paneles fotovoltaicos en configuración individual, y el registro de forma sincronizada las variables eléctricas de voltaje y corriente junto con las ambientales de irradiancia y temperatura. Esta habilidad que no se posee en el laboratorio, permite que los recursos disponibles en desuso pasen a ser funcionales y coherentes. El mecanismo de ajuste de inclinación angular, que permite que el panel escoja un ángulo entre 15° y 45° en incrementos de 5°, es una novedad que añade una variable de control que amplía de forma notable el alcance experimental del banco en comparación con cualquier solución estática.

El proyecto, en su componente metodológico, propone una arquitectura de medición integrada que combina hardware de bajo costo, en particular el microcontrolador ESP32, con una interfaz HMI desarrollada en Python, lo que permite un sistema de adquisición sincronizada multicanal que supera los métodos manuales actuales. Esta arquitectura es replicable, escalable y documentada, lo que le otorga valor más allá del uso inmediato en el DCEM, otros laboratorios universitarios con necesidades similares podrían adoptarla como referencia metodológica para el desarrollo de sus propios sistemas de medición fotovoltaica, tal como lo evidencian trabajos similares desarrollados en la ESPOL y la UPS.

La dimensión social y educativa del proyecto es la que tiene mayor impacto. Los alumnos de Ingeniería Mecánica o Mecatrónica que realicen las prácticas con este banco adquirirán experiencia directa en la medida de parámetros fotovoltaicos en condiciones reales, en el uso de sistemas de adquisición de datos y en la interpretación de las curvas características. Las actividades mencionadas no son comunes, ya que los equipos comerciales de caracterización, por su complejidad y costo, no están disponibles en los laboratorios universitarios de la región. Con la accesibilidad de sus componentes y el uso de software propio, la posibilidad de contar con una herramienta didáctica nos ayudará también a comprender el sistema en su conjunto (sensor e interfaz de procesamiento), cosa que no permiten los equipos comerciales tipo “caja negra”. Las indagaciones realizadas en el área de

educación en ingeniería evidencian que el aprendizaje basado en la instrumentación experimental construida en el propio ámbito académico mejora notablemente la apropiación de conceptos técnicos y el desarrollo de competencias prácticas.

En el aspecto técnico-económico, el diseño propuesto realiza una reutilización de equipos que ya están en el laboratorio, el piranómetro NOVA 240-CMP3, reóstatos de potencia, los propios paneles ARCO, por lo que el gasto adicional se limita a los componentes electrónicos del sistema DAQ y a los materiales de la estructura mecánica, cuyo costo estimado de construcción será inferior a los 1000 USD de presupuesto del proyecto. Equipos comerciales equivalentes para caracterización fotovoltaica, como los trazadores de curvas I-V de marcas como HT Instruments o Chauvin Arnoux, superan los 3000 dólares para el mercado local. Por ello, su adquisición se presenta como inviable a un laboratorio universitario de pregrado a nivel técnico. El costo de implementación y la funcionalidad obtenida posicionan como un banco eficiente y sustentable para el contexto institucional en que se inserta.

Alcance del proyecto

La investigación tiene un alcance aplicado y experimental, y comprende el diseño, construcción, instrumentación, calibración y validación funcional de un banco de ensayos para la caracterización de paneles solares fotovoltaicos, destinado al Laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sede Sangolquí. El sistema se basa en dos módulos fotovoltaicos ARCO de 43 W que se encuentran en el laboratorio, y utilizará las condiciones ambientales del valle de los Chillos para su validación en el funcionamiento real.

En el ámbito mecánico, el proyecto consiste en diseñar e implementar una estructura de soporte de acero galvanizado que es capaz de sostener dos módulos fotovoltaicos. Su sistema de ajuste de inclinación manual, que permite fijar el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, posibilita la elección de posiciones predefinidas de forma mecánica (15° a 45°, en pasos de 5°). Estos dispositivos son topes mecánicos que permitirán que el sistema sea

reproducible sin depender de sensores de posición. El dimensionamiento estructural contempla el análisis de cargas estáticas.

El rango del entorno eléctrico incluye el diseño e implementación de un sistema de conmutación (basado en disyuntores y lógica cableada) que permite configurar los paneles en operación individual, en serie y en paralelo a través de un selector de tres posiciones, además de la incorporación de las pertinentes protecciones para cada modo de operación. La conectividad del banco a la red de baja tensión no es un requerimiento del sistema, así como su operación con inversores.

Referente a la instrumentación y adquisición de datos, el proyecto incorpora la integración y calibración de los siguientes instrumentos: un piranómetro NOVA 240-CMP3 para medir la irradiancia solar en el plano del módulo; once sensores de temperatura DS18B20, que se emplean para medir la temperatura de celda en la cara trasera de los paneles y la temperatura ambiental; dos sensores de corriente ACS712-20A en los terminales de salida de cada panel; y circuitos divisores resistivos para la medición de voltaje. La conversión analógica-digital y acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente se realizará mediante el módulo ADS1115, convertidor de 16 bits externo con interface I2C el cual fue seleccionado por su mayor resolución y estabilidad que el ADC interno del microcontrolador. La señal del piranómetro es adquirida directamente mediante el ADC interno del ESP32 luego de haber sido acondicionada por su módulo dedicado. El microcontrolador ESP32 es la unidad central de procesamiento, alimentado desde una fuente auxiliar de 12 V DC con conversores DC-DC tipo LM2596 que derivan los niveles de 3.3 V y 5 V requeridos por los distintos dispositivos, diseñada conforme a las normas IEC 61010, IEC 60269 e IPC-2221. La calibración de todos los sensores constituye parte integral del proceso de validación metrológica del sistema.

Desde el punto de vista experimental, en configuración individual se obtendrá la curva completa el procedimiento de caracterización corriente-tensión de cada panel con barrido con reóstato de. potencia, de la cual se derivarán los parámetros Isc, Voc, Pmax y factor de forma

(FF); para las configuraciones serie y paralelo, el análisis se limita a la medición y comparación de los valores de Voc e Isc. La HMI, que fue creada en Python, va a permitir ver en tiempo real todas las variables que se van a medir, graficar en forma dinámica las curvas I-V y P-V y almacenar en un formato estructurado en Excel.

El diseño de sistemas de seguimiento solar automatizado, la acumulación de energía por medio de baterías, el modelamiento matemático avanzado del módulo fotovoltaico, las simulaciones computacionales del comportamiento del panel y el análisis de degradación a largo plazo de los módulos están excluidos del proyecto.

Capítulo II

Marco teórico

Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es un conjunto integrado de componentes eléctricos, mecánicos y electrónicos diseñado para captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica utilizable mediante el efecto fotovoltaico (SunFields, 2025). Sus componentes principales incluyen los módulos fotovoltaicos, la estructura de soporte, el sistema de cableado, los dispositivos de protección eléctrica y, según la aplicación, un inversor o regulador de carga. En el contexto de la presente investigación, el banco de ensayos representa un sistema fotovoltaico experimental de pequeña escala, cuyo propósito no es la generación de energía para consumo, sino la caracterización eléctrica de los módulos bajo condiciones reales y reproducibles de operación.

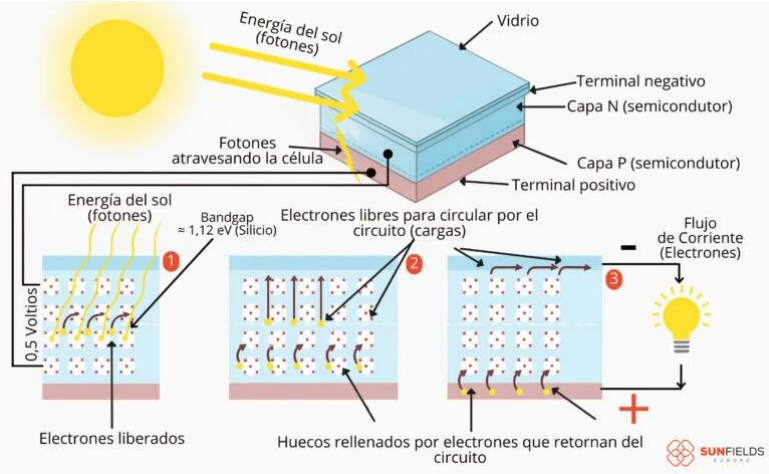
Energía solar fotovoltaica

La conversión de energía solar en energía eléctrica se fundamenta en el efecto fotovoltaico, fenómeno físico por el cual los fotones de la radiación solar incidente sobre un semiconductor tipo p-n transfieren su energía a los electrones del material, generando pares electrón-hueco que se separan bajo la influencia del campo eléctrico interno de la unión y

producen una diferencia de potencial en los terminales del dispositivo (Duffie & Beckman, 2013). Un módulo fotovoltaico comercial está formado por la conexión en serie y paralelo de múltiples celdas individuales, lo que permite alcanzar niveles de tensión y corriente adecuados para aplicaciones prácticas.

Figura 1

Efecto fotovoltaico dentro de una célula solar.



Nota. Tomado de Efecto fotovoltaico: qué es y cómo funciona, SunFields, recuperado de https://www.sfe-solar.com/electricidad/efecto-fotovoltaico/

La Figura 1 ilustra el funcionamiento del efecto fotovoltaico dentro de una célula solar, mostrando cómo la energía de la radiación solar incide sobre el material semiconductor, en la parte superior se observa el apilamiento de capas, donde el vidrio protector y las capas tipo n y tipo p conforman la estructura de la célula, mientras que los terminales positivo y negativo permiten extraer la energía generada. En la parte inferior de la imagen se presenta un texto que indica, paso a paso, cómo los fotones que llegan a su superficie hacen liberar electrones y crear huecos, al mismo tiempo que estas cargas se mueven ordenadamente en el interior del material, produciendo la corriente que sale hacia el circuito externo. Por consiguiente, esta

imagen representa visualmente el proceso que permite transformar la energía luminosa del sol en electricidad de corriente continua por efecto fotovoltaico.

Condiciones estándar de prueba (STC)

Las condiciones estándar de prueba, denominadas STC por sus siglas en inglés Las pruebas (STC, por sus siglas en inglés) hacen referencia a condiciones de prueba estándar internacionalmente reconocidas para medir y declarar los parámetros eléctricos de los módulos fotovoltaicos. Las medidas como los miliamperios y voltios se realizan a radiación que equivale a que reciba el sol, 1000 W/m², y una temperatura en la célula de 25 °C.y una masa de aire AM 1.5 (Haina Solar, 2025). Todos los parámetros indicados en la ficha técnica de un panel, como la potencia nominal, la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto, han sido medidos bajo estas condiciones de referencia. En el banco de ensayos, los mismos se realizan bajo condiciones reales que difieren de las STC, por lo que los resultados obtenidos permiten comparar el comportamiento real de los paneles ARCO con los valores nominales declarados por el fabricante.

Temperatura de operación de la celda

La temperatura de operación de la celda fotovoltaica es uno de los factores ambientales de mayor influencia sobre el rendimiento eléctrico del módulo, dado que un incremento de temperatura por encima de las condiciones STC produce una disminución de la tensión de circuito abierto y, en consecuencia, una reducción de la potencia máxima entregada (Super Solar, 2025).Este efecto se cuantifica mediante el coeficiente de temperatura de potencia del panel, expresado habitualmente en porcentaje por grado Celsius (% /°C), y es un parámetro declarado por el fabricante en la ficha técnica del módulo. En el banco de ensayos desarrollado, la temperatura de la celda se registra mediante sensores DS18B20 distribuidos en la superficie posterior de los paneles, lo que permite analizar su influencia sobre los parámetros eléctricos medidos durante cada ensayo.

Modelo eléctrico del panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico, también denominado módulo fotovoltaico, es una composición una serie de células solares de tipo p n de semiconductor en paralelo, un material protector trasero y un marco estructural de aluminio. Se denomina así al dispositivo que tiene la misión de provocar, a partir de la radiación solar incidente, potencia eléctrica en corriente continua (COIT, 2021). Este ensayo está orientado a caracterizar los paneles fotovoltaicos ARCO de 43W disponibles en el laboratorio en cuanto a los eléctricos en diferentes configuraciones de conexión y condiciones ambientales. Para tal fin, se diseñó un banco de ensayos que se describe a continuación.

El comportamiento eléctrico de una celda fotovoltaica se describe mediante el modelo del diodo ideal, donde la corriente de salida resulta de descontar la corriente circulante por la unión p-n interna a la fotocorriente generada por la radiación incidente (Censolar, 2018).

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1\right)$$

Donde:

$I =$ corriente de salida del panel [A]

$I_{ph} =$ fotocorriente generada por la radiación [A]

$I_0 =$ corriente de saturación del diodo [A]

$V =$ tensión en los terminales del panel [V]

$n =$factor de idealidad del diodo (adimensional, 1 ≤ n ≤ 2)

$V_t = kT/q =$ voltaje térmico [V], con k la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y q la carga del electrón.

Parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico en STC

Los parámetros eléctricos fundamentales de un módulo fotovoltaico se determinan a partir de su curva característica I-V medida en condiciones STC e incluyen: La corriente de cortocircuito (Isc) y la tensión de circuito abierto. Igualmente, la corriente en el punto de máxima

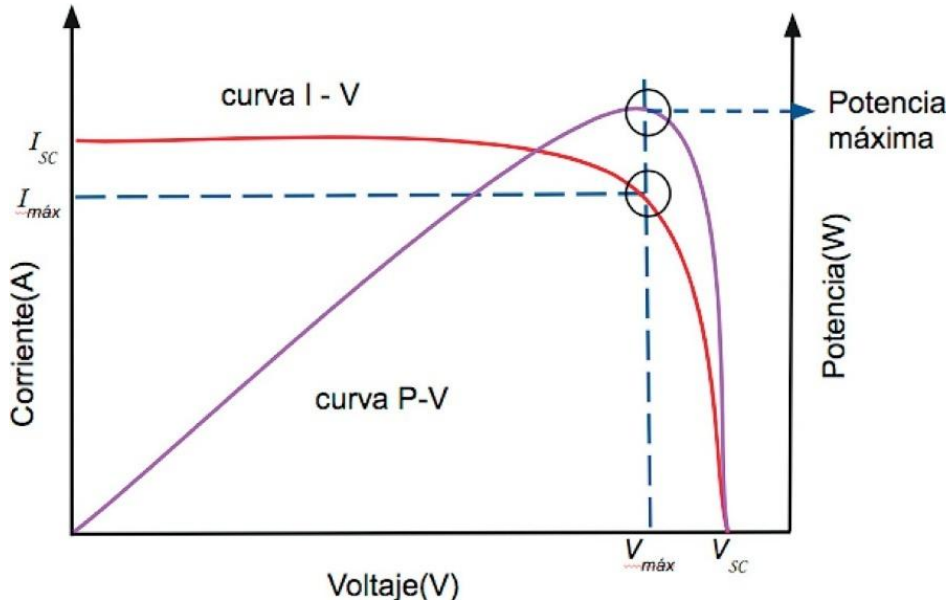
potencia es importante. La corriente máxima (Im), la tensión en el punto de máxima potencia (Vmp) y la potencia máxima (Pmax).(Haina Solar, 2025).Estos valores constituyen la referencia técnica que el fabricante declara en la ficha de datos del panel y que el usuario utiliza para el diseño, dimensionamiento y verificación del rendimiento del sistema. Para el presente caso, la obtención experimental de estos parámetros a partir de las curvas I-V medidas con el banco de ensayos permite evaluar si el comportamiento real de los módulos ARCO se corresponde con las especificaciones del fabricante bajo las condiciones de operación del laboratorio.

Curva característica corriente-tensión (I-V)

La curva característica corriente-tensión (I-V) de un módulo fotovoltaico es la gráfica que representa la relación entre la corriente eléctrica que entrega el panel y la tensión presente en sus terminales para unas condiciones concretas de irradiancia y temperatura, obtenida al variar la carga desde el cortocircuito hasta el circuito abierto (SunFields, 2025). En el extremo de la curva en donde hay tensión cero, la corriente es máxima e igual a la corta corriente Icc. Por el contrario, cuando no pasa corriente, la tensión es máxima y se conoce como tensión de circuito abierto (Voc). Cuando se desplaza la curva, también se desplazan esas dos líneas. En el medio de esos dos puntos se encuentra el punto de máxima potencia, el MPP, que el producto corriente y tensión es máximo y por tanto el panel entrega su potencia eléctrica máxima. La principal referencia para evaluar el rendimiento de un módulo fotovoltaico bajo cualquier condición de ensayo es la forma y la ubicación de la curva I-V.

Figura 1

Curvas características I-V y P-V de un panel fotovoltaico.



Nota. Tomado Implementación en FPGA de un módulo de estimación de parámetros eléctricos basado en línea para un sistema fotovoltaico. (PVS), Clevis Lozano-Rivera y M. Oviedo, recuperado de https://portal.amelica.org/ameli/journal/263/2631042012/html/.

Potencia máxima

El MPP es el punto de máxima potencia para un generador fotovoltaico determinado trabajo de la curva corriente-tensión de un módulo fotovoltaico en el que el producto entre la tensión y la corriente alcanza su valor máximo, entregando así la mayor potencia eléctrica posible para una condición determinada de irradiancia y temperatura (EADIC, 2022). Este punto varía con las condiciones ambientales y su localización a partir de las curvas experimentales constituye uno de los resultados centrales que el banco de ensayos permite obtener.

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$$

Donde V_{mp} *e* I_{mp} Se refieren a la tensión y a la corriente en el punto de máxima potencia respectivamente.

La Figura 3 muestra simultáneamente la curva corriente-tensión (I-V) y la curva potencia-tensión (P-V) de un panel fotovoltaico, destacando el punto de máxima potencia donde el producto entre la tensión y la corriente alcanza su valor máximo y se obtiene el rendimiento óptimo del módulo, para el desarrollo de este trabajo dicha figura resulta fundamental porque sirve como referencia gráfica para interpretar los datos experimentales obtenidos con el banco de ensayos, permitiendo identificar visualmente los parámetros de operación más relevantes, y el comportamiento del punto de máxima potencia bajo diferentes condiciones de irradiancia, temperatura y configuración eléctrica. Además, este esquema respalda la justificación del diseño del sistema de medición, ya que evidencia la necesidad de registrar de manera simultánea la corriente y la tensión para poder calcular la potencia y evaluar el desempeño real de los paneles en las distintas pruebas previstas.

Estructura de soporte de módulos fotovoltaicos

Una estructura de soporte fotovoltaica es el conjunto de elementos mecánicos diseñados para sostener los módulos en la posición y orientación adecuadas, garantizando su estabilidad frente a cargas estáticas como el peso propio y la presión del viento, y permitiendo el ajuste del ángulo de inclinación respecto a la horizontal (Enel X, 2024). El ángulo de inclinación óptimo depende de la latitud del lugar de instalación y de la época del año, y tiene una influencia directa sobre la irradiancia efectiva que recibe el módulo y, por tanto, sobre su producción eléctrica. En este proyecto, la estructura de soporte fabricada en acero galvanizado incorpora un mecanismo de ajuste manual que permite fijar el ángulo de inclinación de los paneles entre 15° y 45° en incrementos de 5°, lo que constituye la variable mecánica de control del banco de ensayos.

Factor de forma

El factor de forma (FF) es un parámetro adimensional que cuantifica la calidad eléctrica de la curva corriente-tensión de un módulo fotovoltaico, indicando qué tan próxima es dicha curva a la forma rectangular ideal delimitada por la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto (Duffie & Beckman, 2013). Un factor de forma cercano a la unidad indica mínimas pérdidas internas por resistencias parásitas y una curva I-V de buena calidad, mientras que Las pérdidas de valores reducidos son debidas a la resistencia de serie o fugas (Censolar, 2018).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

El factor de forma conecta el valor de un panel con cortocircuito. Esta calificación, a través de un único valor, resume la “calidad eléctrica” de la curva I en V, es decir, qué tanto se acerca a un rectángulo ideal sin pérdidas internas. La evaluación del factor de forma permitirá determinar la existencia de pérdidas significativas en el montaje experimental, el cableado, las conexiones y la configuración de carga. Para ello se tomarán los valores de V_{oc}, I_{sc}, V_{mp}, e I_{mp} El banco de ensayos facilita la comparación del factor de forma bajo distintas configuraciones de conexión y condiciones ambientales, lo que permite identificar posibles degradaciones o comportamientos anómalos. Por ejemplo, una disminución importante del factor de forma en una de las configuraciones puede evidenciar problemas de contacto, sombreados parciales o desajustes entre paneles. De esta manera, el factor de forma se utiliza en la investigación como una herramienta cuantitativa de diagnóstico del estado y el rendimiento del sistema fotovoltaico ensayado.

Eficiencia del módulo

Este parámetro depende de la tecnología de fabricación de las células, de la temperatura de operación y de la irradiancia incidente, y constituye el indicador de referencia

para comparar el rendimiento real del módulo con las especificaciones nominales del fabricante (COIT, 2021).

El uso de esta ecuación dentro de la investigación es clave porque vincula los resultados eléctricos medidos con la principal variable ambiental, que es la irradiancia solar. El ensayo reproduce repetidamente las mediciones para diferentes ángulos de inclinación y en varios momentos del día. Esto permite el análisis del ensayo moderado para la mayor eficiencia efectiva del panel, así como el análisis de sus diferentes ángulos de inclinación. Esto proporciona pruebas experimentales relacionadas con el efecto del ángulo de montaje y de las condiciones climáticas sobre el rendimiento de pequeños sistemas fotovoltaicos, lo que se encuentra alineado con la finalidad práctica del proyecto de titulación.

Irradiancia efectiva

La irradiación solar representa la magnitud de la energía radiante que incide sobre la superficie de una unidad; el valor se refiere a la Energía en vatios. La irriga da mínima es un indicador que varía según la latitud del campo fotovoltaico (e-medida, 2024). En el banco de ensayos desarrollado, la irradiancia en el plano del módulo se registra mediante el piranómetro NOVA 240-CMP3, cuyo valor es utilizado para relacionar las condiciones de radiación real con los parámetros eléctricos medidos en cada ensayo.

La expresión de la irradiancia efectiva en función del coseno del ángulo de incidencia describe cómo la orientación del panel con respecto al Sol modifica la cantidad de energía que realmente recibe la superficie del módulo. En el montaje propuesto, esta relación justifica la incorporación de un mecanismo de ajuste de inclinación y la necesidad de medir en forma simultánea la irradiancia y el ángulo de inclinación durante cada ensayo. Aunque en los cálculos se emplea directamente el valor de irradiancia entregado por el sensor, la ecuación explica físicamente por qué la potencia del panel cambia cuando se varía la inclinación de la superficie.

$$G_{ef} = G \cdot \cos(\theta)$$

En la etapa de análisis de resultados, esta relación permite asociar cualitativamente la reducción de potencia medida con el aumento del ángulo de incidencia respecto a la posición óptima del panel. Igualmente, apoya el rango de ángulos a evaluar en el banco de ensayos, evidenciando que, a medida que el coseno del ángulo toma un valor menor, se preserva también la irradiancia efectiva, lo que a la vez incide en la potencia eléctrica que es capaz de entregar el sistema fotovoltaico. Así, se relaciona dicha expresión con el diseño mecánico de la estructura ajustable y el comportamiento eléctrico observado en las pruebas.

Piranómetro

Un piranómetro es un instrumento científico diseñado para medir la irradiancia solar global incidente sobre una superficie plana, la difusa que llega desde el hemisferio celeste, expresada habitualmente en vatios por metro cuadrado (W/m^2) (Seven Sensor, 2025). Su principio de funcionamiento se basa en una termopila o celda de silicio que convierte la energía de la radiación solar en una señal eléctrica proporcional, protegida por una cúpula de vidrio que garantiza la captación uniforme desde todos los ángulos de incidencia (Snowy WikiMeteo, 2026). En el banco de ensayos desarrollado en este proyecto, el piranómetro NOVA 240-CMP3 instalado en el plano de los módulos proporciona la medida de referencia de irradiancia cuya utilización permite relacionar las condiciones ambientales de cada ensayo con la respuesta eléctrica de los módulos fotovoltaicos.

Ángulo de inclinación y orientación del panel

El ángulo de inclinación de un módulo fotovoltaico es el ángulo formado entre el plano de inclinación de un panel solar cuando se junta la normal del módulo y la superficie horizontal y es clave para captar radiación solar en un año en una época geográfica (Powen, 2022). En el caso de instalaciones fijas, el ángulo óptimo suele ser aproximadamente igual a la latitud del lugar; así, en Ecuador, que tiene latitud cerca de 0°, tienden utilizar ángulos bajos de inclinación que favorecen la recepción de radiación directa. En el banco de ensayos, al variar de manera sistemática el ángulo de inclinación desde 15° hasta 45°, se podrá analizar experimentalmente

cómo este parámetro afecta a la irradiancia efectiva sobre los paneles y a los parámetros eléctricos que se generen. Por tanto, esta variación aportará datos de comportamiento real en el Valle de los Chillos.

Configuraciones serie y paralelo

La interconexión eléctrica de múltiples módulos fotovoltaicos puede realizarse en configuración serie, en configuración paralelo o en combinaciones de ambas, con el fin de adaptar los niveles de tensión y corriente del sistema a los requerimientos de la aplicación (Duffie & Beckman, 2013). La elección de la configuración afecta directamente los parámetros eléctricos de salida del conjunto y, en consecuencia, la potencia máxima disponible bajo unas condiciones ambientales determinadas

Cuando los paneles se conectan en serie, la tensión total aumenta mientras la corriente se mantiene aproximadamente igual a la del panel más débil; cuando se conectan en paralelo, la corriente total se incrementa y la tensión se mantiene cercana al valor de un solo módulo.

Configuración serie

En una configuración serie, los módulos fotovoltaicos se conectan encadenando el terminal positivo de uno con el terminal negativo del siguiente, de manera que la tensión total del conjunto es la suma de las tensiones individuales de cada módulo, mientras que la corriente que circula por el sistema es igual a la del módulo con menor corriente de cortocircuito. Esta configuración se emplea cuando se requiere aumentar el nivel de tensión de salida manteniendo la corriente constante, y es especialmente sensible al efecto de sombras parciales, ya que un módulo sombreado limita la corriente de todo el string (SVF Centroamérica, 2025).

$$V_{serie} = V_{oc1} + V_{oc2}, \quad I_{serie} = \min(I_{sc1}, I_{sc2})$$

Configuración paralela

En una configuración paralelo, todos los terminales positivos de los módulos se conectan entre sí y todos los negativos también, de forma que la tensión de salida del conjunto

es igual a la tensión de un módulo individual, mientras que la corriente total es la suma de las corrientes aportadas por cada módulo. Esta configuración permite aumentar la corriente de salida del sistema manteniendo la tensión constante, y resulta menos sensible al sombreado parcial que la configuración serie, ya que un módulo afectado no interrumpe el flujo de corriente de los demás (SVF Centroamérica, 2025).

$$I_{paralelo} = I_{sc1} + I_{sc2}, \quad V_{paralelo} = \min(V_{oc1}, V_{oc2})$$

Se utilizo estas relaciones para verificar que las medidas de tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito obtenidas en cada configuración coincidan con los rangos esperados teóricamente. Esto hace que se pueda comprobar que los elementos de conmutación, el cableado y la lógica de control implantada en el microcontrolador del sistema de adquisición de datos funcionan como es debido. Asimismo, se evalúan las configuraciones serie y paralelo, tomando como base los resultados de las pruebas realizadas en el banco de ensayos a diferentes niveles de irradiancia, temperatura y carga eléctrica; sus ventajas y desventajas.

Sistema de adquisición de datos (DAQ)

Un sistema de adquisición de datos, comúnmente denominado DAQ por su sigla en inglés (Data Acquisition), es el denominado conjunto de sensores, hardware de medida y software que es capaz de medir (en el caso de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia) y convertir el fenómeno físico o eléctrico en una señal digital capaz de ser utilizada, visualizada y almacenada por un computador o microcontrolador. Elaborado por Imc Test y Measurement. El hardware embebido de bajo costo que se emplea en sistemas DAQ ofrece más flexibilidad y capacidad de sincronización multicanal en comparación con sistemas de medición tradicionales. Adicionalmente, permite el acoplamiento con interfaces de usuario de software (National Instruments, 2024). En el trabajo que se presenta, la unidad de adquisición de datos (DAQ) empleada tiene como unidad central al microcontrolador ESP32, que trabaja con el conversor analógico-digital ADS1115 de 16 bits y con sensores de tensión, corriente y

temperatura, que constituyen así la arquitectura de adquisición sincronizada del banco de ensayos.

Banco de ensayos

Un banco de ensayos es un sistema integrado de elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control, diseñado con el propósito de reproducir condiciones de operación definidas y medir el comportamiento de un componente o sistema bajo estudio en un entorno controlado y repetible (Mejía-Lotero, 2022). Su objetivo principal es facilitar la verificación, validación y análisis de prestaciones de equipos o sistemas, y en el ámbito universitario constituye una herramienta de formación experimental que permite a los estudiantes desarrollar competencias prácticas en medición, instrumentación y análisis de datos.

Capítulo III

Metodología y diseño

Enfoque de investigación

El presente trabajo se desarrolló bajo un enfoque aplicado, cuantitativo y experimental, debido a que se orienta al diseño, construcción e integración de un banco de ensayos para la medición de variables eléctricas, térmicas y ambientales en paneles solares fotovoltaicos. El proyecto responde a una necesidad técnica del Laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, donde se requiere una plataforma que permita caracterizar módulos fotovoltaicos bajo condiciones reales de operación.

El enfoque ágil se manifiesta en la presentación de una solución física consistente en un mecanismo con variación angular mecánica, un sistema eléctrico de conmutación por disyuntores y lógica estructural mediante cableado, sensores de medición, un equipo de adquisición de datos basado en ESP32 y una HMI en Python. Así, este banco permite el

registro sincrónico de variables como voltaje, corriente, irradiancia, temperatura, ángulo de inclinación y potencia eléctrica.

Tabla 2

Variables principales consideradas en el banco de ensayos.

Elemento	Función dentro del banco	Variable o función asociada
Paneles ARCO 43 W	Elementos bajo ensayo	V, I, P
Estructura mecánica	Soporte y variación angular	θ
Reóstato de potencia	Barrido manual de carga	Curva I-V
Piranómetro NOVA 240-CMP3	Medición de irradiancia solar	G
Sensores DS18B20	Medición de temperatura	Tc, Ta
Sensores ACS712-20ª	Medición de corriente	I
Divisores resistivos	Acondicionamiento de voltaje	V
ADS1115	Conversión analógico-digital externa	Digitalización de señales
ESP32	Unidad de procesamiento y comunicación	DAQ
HMI en Python	Procesamiento, visualización y almacenamiento	Curvas I-V/P-V y Excel

Nota. Elaboración propia

La potencia eléctrica instantánea se calcula mediante la relación entre voltaje y corriente:

$$P_i = V_i I_i$$

Donde:

- ✓ Pi es la potencia eléctrica instantánea del panel en el instante i, expresada en watts [W].
- ✓ Vi es el voltaje medido en los terminales del panel en el instante i, expresado en volts [V].
- ✓ Ii es la corriente entregada por el panel en el instante i, expresada en amperes [A].

Esta ecuación se aplica en el sistema de adquisición y procesamiento, puesto que cada muestra que va registrando el DAQ tiene valores de voltaje y corriente que se sincronizaron. La potencia instantánea se calcula a partir de estos valores y se generan las curvas I-V y P-V del panel ensayado.

Tipo y diseño de investigación

La investigación se realiza tipo desarrollo tecnológico de tipo aplicado, de diseño experimental de validación funcional. Se considera aplicada, ya que su interés principal consiste en resolver una necesidad particular de laboratorio mediante la construcción de un banco de ensayos operativo de bajo costo. Es experimental ya que permite cambiar las condiciones de prueba, registrar variables físicas y eléctricas y el comportamiento de los paneles fotovoltaicos en distintas configuraciones.

La unidad técnica no es una población humana sino el sistema físico que integra el banco de ensayos, dos módulos fotovoltaicos ARCO de 43 W, la estructura ajustable, los sensores, el sistema DAQ y la interfaz HMI. Se realizarán pruebas funcionales que ayudarán a calibrar los sensores y verificar que las medidas obtenidas son las correctas.

Metodología de diseño mecatrónico

El desarrollo del banco de ensayos se estructuró bajo la metodología de diseño mecatrónico VDI 2206, debido a que permite organizar el proyecto desde la definición de requerimientos hasta la integración y validación de los subsistemas. Esta metodología resulta

adecuada para el presente trabajo porque el banco integra componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y computacionales.

La secuencia aplicada al proyecto se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Requerimientos del banco} \rightarrow \text{Diseño conceptual} \rightarrow \text{Diseño por subsistemas} \rightarrow \text{Integración mecatrónica} \rightarrow \text{Verificación técnica} \rightarrow \text{Validación funcional.}$$

Donde:

- ✓ Requerimientos corresponde a las capacidades funcionales que debe cumplir el banco.
- ✓ El diseño de subsistemas es una actividad que comprende el desarrollo mecánico, eléctrico, electrónico y de software.
- ✓ La construcción implica llevar a la práctica las ideas diseñadas.
- ✓ La integración se entiende como la vinculación de los subsistemas en una plataforma funcional.
- ✓ La validación es la verificación del cumplimiento de las funciones establecidas.

Tabla 3

Relación entre objetivos específicos y subsistemas del banco

Objetivo específico	Subsistema asociado	Producto verificable
Crear y edificar la estructura base con modificación en la inclinación.	Maquinaria.	Compatibilidad de dos paneles.
Entregar la instrumentación para mediciones fotovoltaicas.	Instrumentación de sistemas.	Sensores y circuitos de medida.
Diseñar y construir un sistema de adquisición de datos.	Dispositivo DAQ.	Unidad ESP32, ADS1115 y comunicación UART/USB.

Objetivo específico	Subsistema asociado	Producto verificable
Crear y ejecutar el sistema informático.	Sistema HMI.	Interfaz en Python, curveado y guardado.

Nota. Elaboración propia.

Definición de sistemas

El banco de ensayos se definió como un sistema mecatrónico integrado, compuesto por subsistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y computacionales. Esta división permite organizar el diseño de manera modular, facilitando la construcción, diagnóstico, calibración y validación de cada parte del sistema.

La arquitectura funcional general del banco se expresa como:

$$Paneles\ FV \rightarrow Reóstato \rightarrow Sensores \rightarrow DAQ \rightarrow HMI \rightarrow Excel.$$

Donde:

- Paneles FV corresponde a los dos módulos fotovoltaicos ARCO de 43 W.
- Reóstato corresponde a la carga variable manual empleada para el barrido de la curva I-V.
- Sensores corresponde a los dispositivos de medición de voltaje, corriente, irradiancia y temperatura.
- DAQ corresponde a la unidad de adquisición de datos basada en ESP32 y ADS1115.
- HMI corresponde a la interfaz desarrollada en Python para visualización y procesamiento.
- Excel corresponde al archivo de almacenamiento estructurado de datos crudos y procesados.

Tabla 4

Subsistemas principales del banco de ensayos fotovoltaico.

Subsistema	Función principal	Componentes asociados
Sistema mecánico	Soportar los paneles y permitir el ajuste angular	Armazón milano superior para acoplamiento a transportador.

Sistema eléctrico de potencia y protecciones	Permitir conexión segura y conmutación por disyuntores	Disyuntores para FV, fusibles gPV, breaker DC FV, DPS, conductores, tablero.
Sistema de instrumentación	Para medir ciertas variables eléctricas, térmicas y ambientales.	Divisores resistivos-ADS115, DS18B20, ACS712-20A, piranometro
Sistema de adquisición de datos	Transformar y difundir señales captadas.	ESP32, ADS1115, alimentación auxiliar, y comunicación I2C y UART/USB.
HMI software system.	Organizar, mostrar y almacenar información.	Python, customTkinter, Matplotlib, PySerial y OpenPyXL.

Nota: Elaboración propia.

El sistema mecánico que presenta el banco es la estructura que sirve de soporte, fabricado en acero galvanizado y diseñado para alojar dos paneles fotovoltaicos. Este mecanismo que es manual, permite al operario posicionar los módulos en inclinaciones fijas, que van desde 15° a 45°, en pasos de 5°.

El sistema eléctrico de potencia y protecciones permite operar los paneles en forma individual, en serie y en paralelo mediante el uso de disyuntores y lógica cableada.

Este subsistema posee la inclusión de protección de continua, conductores dimensionados y tablero eléctrico de 80 x 60 x 30 cm. La dimensión elegida ubica en su interior los elementos de maniobra, protecciones, fuente de alimentación, acondicionador del piranómetro y unidad DAQ, manteniendo separación física entre potencia y señales de bajo nivel.

El sistema de instrumentación está constituido por los dispositivos necesarios para medir las variables del ensayo. Accesorios para medir las variables del sistema.

El sistema DAQ implementa un microcontrolador ESP32 como unidad central. El ADC interno del ESP32 será usado para la adquisición de la señal acondicionada del piranómetro, mientras que el ADS1115 se usará para la digitalización de una señal de tensión y corriente. La comunicación entre el DAQ y la computadora se realiza mediante UART/USB.

El sistema HMI fue desarrollado en Python y permite recibir los datos enviados por el ESP32, procesar las variables medidas, calcular parámetros fotovoltaicos, graficar curvas I-V y P-V, y almacenar la información en archivos Excel.

Requerimientos

En el presente proyecto, los requerimientos se establecieron a partir de la función principal del banco: permitir la caracterización experimental de paneles solares fotovoltaicos mediante mediciones eléctricas, térmicas y ambientales, integradas en una plataforma mecatrónica de uso didáctico y experimental.

Los módulos ARCO de 43 W para el sistema, están disponibles en el laboratorio. Además, considera una estructura de soporte con ajuste manual de inclinación entre 15° y 45°, instrumentación para voltaje, corriente, irradiancia y temperatura, adquisición de datos mediante ESP32/ADS1115, y una HMI en Python para visualización y almacenamiento de resultados.

Diseño del sistema mecánico de la estructura

Configuración del análisis estático

El estudio estructural fue configurado como análisis estático en Autodesk Inventor. La gravedad se aplicó con una magnitud de 9810 mm/s² en dirección del eje Y negativo. Además, el modelo incorporó restricciones fijas en seis puntos de apoyo y contactos tipo *bonded* o bloqueados entre los elementos estructurales.

Tabla 5
Configuración general del análisis estático

Parámetro	Condición aplicada
Software	Autodesk Inventor 2026.1

Tipo de estudio	Análisis estático
Archivo analizado	Ensamble estructura metálica para simulación.iam
Gravedad	9810 mm/s²
Dirección de gravedad	Eje Y negativo
Restricciones	Restricciones fijas
Contactos	Bloqueados / bonded
Elementos de malla curva	Sí
Material principal	Acero galvanizado

Nota. Elaboración propia con base en el reporte de análisis estático.

- **Soporte con ajuste angular manual**

El estudio permitió verificar el comportamiento mecánico del soporte bajo condiciones de carga estática, considerando el peso propio del modelo, dos fuerzas externas de 25 N y la gravedad aplicada en dirección vertical negativa. El modelo presentó una masa de 10.657 kg, volumen de 1357580 mm³ y fue definido con acero galvanizado como material principal, con límite de elasticidad de 207 MPa.

El análisis consideró dos fuerzas externas de 25 N aplicadas sobre el soporte y la acción de la gravedad con una magnitud de 9810 mm/s². A partir de la masa del modelo, el peso propio se calculó mediante:

$$W = mg$$

$$W = 104.54\ N$$

El resultado obtenido fue:

$$F_T = W + F_{externa} = 154.54$$

Considerando las dos fuerzas externas, la carga vertical aproximada fue:

$$F_T = W + F_{externa} = 154.54$$

Los resultados principales del análisis fueron favorables. La tensión máxima de Von Mises fue de 74.5167 MPa, el desplazamiento máximo fue de 0.2731 mm y el factor de seguridad mínimo fue de 2.7779. Estos valores indican que el soporte trabaja dentro del rango elástico del material, con deformación reducida y margen de seguridad adecuado para la operación prevista.

El estudio reveló resultados positivos en general. La máxima tensión de Von Mises fue 74.5167 MPa, el desplazamiento máximo fue 0.2731 mm y el factor de seguridad mínimo fue 2.7779. Se deduce que el soporte se desenvuelve en el límite elástico del material, con una deformación pequeña y un margen de seguridad apropiado a su utilización.

La verificación de resistencia se realizó comparando la tensión máxima de Von Mises con el límite de elasticidad del acero galvanizado:

$$\sigma_{VM} < \sigma_y$$

$$74.5167\ MPa < 207\ MPa$$

Por tanto, el soporte cumple la condición de resistencia. Además, la utilización del material fue de **35.99 %**, lo que indica que la estructura conserva una reserva elástica suficiente bajo las cargas evaluadas.

Factor de Seguridad

Véase en la Figura 7.

El factor de seguridad se calculó mediante:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}}$$

Con los valores del análisis, el resultado fue:

$$FS = 2.777$$

Este valor coincide con el factor de seguridad mínimo reportado por Autodesk Inventor. Al ser mayor que la unidad, se verifica que el soporte tiene un margen resistente suficiente para las cargas consideradas.

El valor máximo de desplazamiento obtenido fue de 0.273 mm, un valor bajo para la estructura de laboratorio. Luego de realizar las pruebas es posible concluir que el sistema tiene rigidez suficiente para mantener la posición angular del panel.

En suma, el análisis estático del soporte con ajuste angular manual cumple con el coeficiente de seguridad, rigidez y resistencia del diseño. La tensión máxima se mantiene por debajo del límite elástico del material, el factor de seguridad es mayor que la unidad y el desplazamiento máximo es reducido. Por ello, el soporte se considera adecuado para integrarse al banco de ensayos fotovoltaico.

Estructura principal de soporte

Investigación de los resultados obtenidos del análisis del soporte con ajuste angular manual, se incorporó en el análisis la gravedad y fuerzas de reacción. Se aplican estas reacciones a la estructura principal como si fueran cargas externas y se agrupan en tres magnitudes, 105.023 N, 8.516 N y 90.155 N. Cada uno fue aplicado en 4 puntos del modelo, con componentes definidas en los ejes X, Y, Z.

Tabla 6

Resumen de fuerzas externas aplicadas en la simulación

Grupo de fuerzas	Cantidad	Magnitud por fuerza	Componente dominante	Unidad
Force 1 a Force 4	4	105.023	Elementos X, Y y Z.	N
Force 5 a Force 8	4	8.516	Elementos Y y Z.	N

Grupo de fuerzas	Cantidad	Magnitud por fuerza	Componente dominante	Unidad
Force 9 a Force 12	4	90.155	Componentes Y y Z.	N

Nota. Elaborador en sí mismo con base en un análisis estéreo.

La suma vectorial de estos componentes se utilizó para interpretar el efecto total de las cargas externas.

$$\overrightarrow{F_R} = \left(\sum F_x\,, \sum F_y\,, \sum F_z\right)$$

A partir de las componentes reportadas, se obtuvo una resultante aproximada de.:

$$\overrightarrow{F_R} = (0,\ -308.836,\ 0.032)$$

La magnitud de la fuerza externa fue hallada por:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

El resultado obtenido fue:

$$F_R = 308.836$$

Como resultado las componentes horizontales se compensan prácticamente por simetría y la componente vertical negativa es dominante. Esto es coherente con una estructura de soporte sometida principalmente a cargas gravitacionales y verticales.

El peso propio del modelo se determinó a partir de la masa reportada por Autodesk Inventor. Para ello se aplicó la relación:

$$W = mg$$

Donde m es la masa del modelo y g es la aceleración de la gravedad. Considerando la masa reportada de 44.3081 kg y g = 9.81 m/s², el peso propio calculado fue:

$$W = 434.66\ N$$

Tabla 7

Peso propio del modelo estructural

Parámetro	Símbolo	Resultado	Unidad
Masa del modelo	m	44.308	kg
Gravedad	g	9.81	m/s²
Peso propio	W	434.66	N

Nota. Preparación propia fundamentada en el informe de análisis estático.

Se valoró la carga vertical total aproximada a partir del peso propio del modelo y la resultante vertical externa:

$$F_T = W + |F_y|$$

El resultado obtenido fue:

$$F_T = 743.50$$

A partir de esta condición, el análisis estático reportó los esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad del modelo.

El reporte de simulación presenta los resultados principales del análisis estructural, incluyendo tensión equivalente de Von Mises, tensiones principales, desplazamiento, coeficiente de seguridad y deformación equivalente. Los valores más relevantes para la validación mecánica son la tensión máxima de Von Mises, el desplazamiento máximo y el coeficiente de seguridad mínimo.

Tabla 8

Resultados principales del análisis estático

Resultado	Mínimo	Máximo	Unidad

Tensión de Von Mises	0.0000011	91.384	MPa
Primera tensión principal	-20.427	85.666	MPa
Tercera tensión principal	-76.068	19.225	MPa
Desplazamiento	0	2.217	mm
Coeficiente de seguridad	2.265	15	—
Deformación equivalente	0.000000000005	0.0003	—
Tensión XX	-66.190	60.8814	MPa
Tensión YY	-67.411	34.701	MPa
Tensión ZZ	-39.830	59.175	MPa

Nota. Construcción personal de acuerdo al informe de análisis estático

Figura 2

Resumen de resultados del análisis estático.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	5644340 mm^3	
Masa	44.3081 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000119886 MPa	91.3847 MPa
Primera tensión principal	-20.427 MPa	85.6667 MPa
Tercera tensión principal	-76.068 MPa	19.2258 MPa
Desplazamiento	0 mm	2.21773 mm
Coeficiente de seguridad	2.26515 su	15 su
Tensión XX	-66.1908 MPa	60.8814 MPa
Tensión XY	-17.7746 MPa	20.4128 MPa
Tensión XZ	-19.7003 MPa	43.6873 MPa
Tensión YY	-67.4119 MPa	34.7015 MPa
Tensión YZ	-20.9147 MPa	20.9129 MPa
Tensión ZZ	-39.8304 MPa	59.175 MPa
Desplazamiento X	-0.407678 mm	0.301884 mm
Desplazamiento Y	-1.73234 mm	0.028964 mm
Desplazamiento Z	-0.440232 mm	1.51116 mm
Deformación equivalente	0.00000000000522047 su	0.000358352 su
Primera deformación principal	-0.00000271356 su	0.000387624 su
Tercera deformación principal	-0.000304186 su	0.00000674624 su
Deformación XX	-0.000238667 su	0.000218556 su
Deformación XY	-0.000103012 su	0.000118301 su
Deformación XZ	-0.000114172 su	0.000253188 su
Deformación YY	-0.000263994 su	0.00015726 su
Deformación YZ	-0.00012121 su	0.0001212 su
Deformación ZZ	-0.000146062 su	0.000230077 su
Presión de contacto	0 MPa	1024.53 MPa
Presión de contacto X	-181.195 MPa	259.227 MPa
Presión de contacto Y	-423.865 MPa	925.778 MPa
Presión de contacto Z	-149.003 MPa	354.11 MPa

Nota. Elaboración propia

La imagen refleja el resultado del análisis estático por el método de los elementos finitos de la estructura metálica, así como la tensión de Von Mises, el desplazamiento, el coeficiente de seguridad y todas las deformaciones.

En función de los resultados conseguidos se realizó una verificación global del sistema mecánico en función de tres criterios: resistencia, seguridad y rigidez. La evaluación de la resistencia se llevó a cabo mediante la utilización de la tensión equivalente de Von Mises, mientras que la seguridad fue evaluada mediante el factor de seguridad mínimo y la rigidez mediante el desplazamiento máximo relativo.

Tabla 9

Resumen de cumplimiento del diseño mecánico

Criterio evaluado	**Resultado obtenido**	**Condición técnica**	**Evaluación**
Tensión máxima de Von Mises	91.384MPa	Menor que 207 MPa	Cumple
Utilización del material	44.15 %	Menor que 100 %	Cumple
Reserva elástica	115.62 MPa	Positiva	Cumple
Factor de seguridad mínimo	2.265	Mayor que 1	Cumple
Desplazamiento máximo	2.217 mm	Reducido	Cumple
Desplazamiento relativo	0.1167 %	Bajo respecto a la longitud característica	Cumple

Material estructural	Acero galvanizado	Definido en simulación	Adecuado
Perfil estructural	ISO 10799-2 30 × 30 × 2	Definido en simulación	Adecuado

Nota. Elaboración propia con base en el reporte de análisis estático.

Los hallazgos muestran que el diseño mecánico cumple con los criterios de robustez, rigidez y seguridad estructural. Durante el ensayo, la tensión máxima se impone por debajo del límite de elasticidad, aspirándose a que el factor de seguridad sea superior a la unidad y que el desplazamiento relativo sea reducido. De esta forma, la estructura es adecuada para absorber los efectos de los elementos del banco de ensayos y mantenerlos en condiciones de operación.

El análisis realizado en Autodesk Inventor de forma estática permitió comprobar el comportamiento mecánico de la estructura. El modelo cuyo peso es 44.3081 kg fue evaluado en gravedad, fuerzas externas, restricciones fijas y contactos bloqueados. La estructura está hecha de perfiles tubulares cuadrados ISO 10799-2 30 × 30 × 2, de acero galvanizado.

Se estimó un peso propio de 434.66 N y una resultante externa de aproximadamente 308.836 N, generando una carga vertical total estimada de 743.50 N. Bajo esta condición, el análisis reportó una tensión máxima de Von Mises de 91.3847 MPa, valor inferior al límite de elasticidad del material de 207 MPa.

La utilización del material fue de 44.15 %, con una reserva elástica de 115.62 MPa. Además, el factor de seguridad mínimo fue de 2.2651, lo cual evidencia un margen resistente favorable para la estructura. El desplazamiento máximo fue de 2.2177 mm, equivalente a un desplazamiento relativo de 0.1167 % respecto a la longitud característica considerada.

En consecuencia, el sistema mecánico diseñado cumple con los requerimientos de soporte, estabilidad y rigidez necesarios para el banco de ensayos fotovoltaico. La estructura puede integrarse con los subsistemas eléctrico, de instrumentación, adquisición de datos y software HMI sin comprometer su estabilidad durante la operación experimental.

- **Diseño del sistema eléctrico de potencia, tablero y protecciones**

El sistema eléctrico de potencia y protecciones permite una conexión segura de los módulos fotovoltaicos, protege los elementos del banco sobre corrientes y sobretensiones, y garantiza una distribución ordenada del tablero de control. El banco permite trabajar con configuraciones individual, serie y paralelo, mediante lógica cableada y disyuntores, evitando el uso de selectores o relés de potencia.

El sistema considera una tensión nominal de potencia de hasta 40 VDC en configuración serie, tensión de servicio de 110 VAC / 60 Hz, tensión de control de 12 VDC, 5 VDC y 3.3 VDC, corriente nominal de 8 A en configuración paralelo y grado de protección IP65.

Características generales del tablero.

Tabla 10

Características generales del sistema eléctrico del banco

Parámetro	Diseño valioso
Tensión nominal de circuitos.	Cuarenta Voltios Corriente Continua.
Estrés en el servicio.	110 v 60 hz
Controles de tensión.	12 VCD / 5 VCD / 3.3 VDC.
Tensión nominal.	8 A
Parámetros de explotación.	Individualmente, en serie y en paralelo.

Nivel de protección.	IP65.
Mesa final.	dimensiones 80 × 60 × 30 cm
Diferenciación funcional.	Dificultades con estas fuerzas.

Nota. Creación propia fundamentada en los diagramas eléctricos del banco.

Configuraciones eléctricas del banco

La configuración individual permite analizar cada panel de forma independiente; la conexión en serie permite incrementar la tensión total del arreglo; y la configuración en paralelo permite incrementar la corriente disponible.

Las relaciones eléctricas principales son:

$$V_{serie} = V_1 + V_2$$

$$I_{paralelo} = I_1 + I_2$$

Tabla 11

Configuraciones eléctricas del banco de ensayos

Configuración	Relación principal	Aplicación
Individual	Medición independiente de cada panel	Caracterización básica
Serie	Suma de tensiones	Comparación de voltaje total
Paralelo	Suma de corrientes	Condición crítica de corriente

Nota. Creación propia

Protecciones eléctricas

Para la protección de los paneles se seleccionaron fusibles tipo gPV de 15 A / 1000 VDC, instalados en portafusibles EBASEE RT18-32. Esta elección cumple con la función de

proteger los paneles de corrientes inversas y cortocircuitos. La selección definitiva del fusible debe verificarse con la corriente máxima de protección en serie declarada por el fabricante del módulo y con la capacidad de conducción del cable utilizado. Esto se debe a que se trata de un valor de disponibilidad comercial y, además, un valor certificado para corriente continua fotovoltaica.

La corriente que tendrá el sistema de fotografía, se determinará a partir de la corriente de cortocircuito total del arreglo:

$$I_{sc,total} = I_{sc1} + I_{sc2}$$

$$I_{diseño} = 1.5 I_{sc,total}$$

También se seleccionó un breaker DC Moreday MDB1Z-63 de 2P/600VDC/16A Parámetro Valor, debido a su capacidad de seccionamiento bipolar y operación en corriente continua. Para protección contra sobretensiones se seleccionó un DPS Moreday MDSP-600 de 2P / 600 VDC, Clase II, con capacidad de derivación de hasta 20 kA.

Tabla 12

Protecciones seleccionadas para el sistema de potencia

Elemento	Selección	Función
Fusible gPV	Moreday MDPVF-30, 15 A / 1000 VCC.	Protección contra overcurrent.
Portafusible	EBASEE RT18-32	Cierre de fusibles en corriente continua
Breaker DC	Más day MDB1Z-63, 2P / 600 VDC / 16 A.	Fraccionamiento y seguridad.

Elemento	Selección	Función
DPS	Moreday MDSP-600, 2P / 600 VCC.	Protección contra sobretensiones
Conductor de potencia	AWG 12	Conducción de potencia DC

Nota. Elaboración propia

Selección de conductores

Para las líneas de potencia se seleccionó conductor de cobre AWG 12, debido a que permite coordinarse adecuadamente con el breaker de protección y reducir la caída de tensión en el sistema. Para verificar esta condición se evaluó la configuración más desfavorable, correspondiente a la conexión en paralelo de los dos paneles fotovoltaicos, ya que presenta la máxima corriente circulante. Considerando una corriente nominal de 6.52 A, una longitud máxima estimada de 3 m, una tensión nominal de 13.2 V y una resistencia del conductor AWG 12 de 0.0052 Ω/m, se obtuvo una caída de tensión de 1.54 %, valor inferior al 3 % máximo recomendado para sistemas de baja tensión.

La caída de tensión se evalúa mediante:

$$\Delta V = 2LIR$$

$$\%\Delta V = \frac{\Delta V}{V_n} \times 100$$

Tabla 13

Verificación de caída de tensión en conductores

Parámetro	Valor
Corriente paralelo nominal	6.52 A
Longitud máxima estimada	3 m
Voltaje nominal	13.2 V
Resistencia AWG 12	0.005Ω/m
Caída de tensión calculada	1.54 %
Límite recomendado	3 %
Evaluación	Cumple

Nota. Elaboración propia

Distribución del tablero

La secuencia de distribución del tablero fue por nivel funcional - zona de potencia, zona de maniobra y zona de señales. Esta separación permite disminuir interferencias eléctricas, incrementar la seguridad de funcionamiento y simplificar el mantenimiento.

La disposición de la Figura 1 se considera que tendrá una primera fila de protecciones y entrada de potencia, en segunda fila en maniobra mediante breakers y en tercera fila el sistema DAQ, fuente auxiliar y acondicionador del piranómetro. Se indica un espaciado entre rieles DIN y canaletas para el ordenado cableado de los conductores, así como la disipación de calor y el radio de curvatura correspondiente para conductores AWG 12.

Tabla 14

Distribución interna del panel.

Zona	Lugar	Mecanismos
Potencia y protección	Fila superior	Interruptores automáticos, fuente de alimentación.
Maniobra	Fila intermedia	Disyuntores para circuitos eléctricos.
Control y señales	Fila inferior	Fuentes de alimentación externas para DAQ.

Nota. Elaboración propia

Diseño del sistema de instrumentación y adquisición de datos

El sistema de instrumentación y adquisición de datos activa un proceso que permite medir, acondicionar, digitalizar y transmitir las variables para caracterizar el comportamiento de los paneles. Estos se denominarán los parámetros del sistema. Se incorporan en el diseño divisores resistivos, sensores ACS712-20A, sensores DS18B20, piranómetro NOVA 240-CMP3, acondicionador de señal, módulo ADS1115 y microcontrolador ESP32.

Variables medidas

Tabla 15

Variables medidas por el sistema de instrumentación

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

Nota. Elaboración propia

Medición de voltaje

La forma de medir tensión es a través de divisores resistivos, cuyo objetivo es realizar el ajuste de la tensión generada por los paneles al rango de lectura del conversor ADS1115. Esta etapa impide que el ADC haga una entrada disrumpida y reconstruye el voltaje real del panel a partir del factor de escala del divisor.

La relación del divisor resistivo se expresa como:

$$V_{ADC} = V_{PV} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Para recuperar el voltaje real del panel se utiliza:

$$V_{PV} = V_{ADC} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Medición de corriente

La corriente generada por los paneles se mide mediante sensores ACS712-20A. Estos sensores entregan una señal analógica proporcional a la corriente medida, con un voltaje de referencia alrededor del punto medio de alimentación. La corriente se obtiene mediante:

$$I = \frac{V_{out} - V_{offset}}{S}$$

Donde Vout es el voltaje de salida del sensor, Voffset es el voltaje de referencia sin corriente y S es la sensibilidad del sensor.

Medición de temperatura e irradiancia

La temperatura se mide mediante sensores DS18B20 conectados al ESP32 por comunicación digital. Esta selección permite utilizar varios sensores en el sistema, distribuidos en puntos representativos del banco, manteniendo una conexión simple y estable. La irradiancia se mide mediante el piranómetro NOVA 240-CMP3 y su acondicionador de señal. Este acondicionador recibe alimentación de 12 VDC y entrega una señal acondicionada para ser leída por el sistema de adquisición. Se justifica la selección de una fuente de 12 VDC precisamente para alimentar directamente este acondicionador y evitar reguladores adicionales.

Conversión analógica-digital y DAQ

El módulo ADS1115 se usa para digitalizar las señales analógicas de voltaje y corriente. El ESP32 funciona como unidad central de adquisición y procesamiento, recibe señales digitales de temperatura, señales analógicas acondicionadas, y datos vía ADS1115.

Tabla 16

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 del calor.
UART/USB	Comunicación con el HMI.

Nota. Elaboración propia

Diseño del sistema de software HMI

El sistema de software HMI fue diseñado con la finalidad de permitir la supervisión, adquisición, procesamiento, visualización y almacenamiento de los datos obtenidos durante los ensayos. La interfaz se ha realizado en Python, dado que este lenguaje permite facilitar la comunicación serial, realizar procesamiento numérico, visualización gráfica y exportación a Excel. La HMI actúa como la principal interfaz entre el operador y el banco de ensayos. En esta plataforma se elige el tipo de ensayo, se inicia o interrumpe la adquisición de datos, se visualizan las variables medidas y se generan las curvas características de los paneles fotovoltaicos. El sistema tiene la posibilidad de almacenar la información que se obtiene en cada ensayo, con el fin de facilitar el posterior análisis.

Arquitectura general de la HMI

La arquitectura del software se planteó de manera modular en la que se tiene la separación de cada uno de las funciones como la interfaz gráfica, comunicación serial, procesamiento de datos, graficación y almacenamiento. Esta decisión permite que el programa sea más ordenado, fácil de mantener y adaptable a futuras mejoras. La interfaz fue construida mediante tkinter y customtkinter, mientras que las gráficas se integraron mediante Matplotlib. Para la comunicación con el sistema de adquisición se empleó PySerial, y para el almacenamiento de datos se utilizó openpyxl, permitiendo generar archivos en formato .xlsx.

Tabla 17

Componentes 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.

Módulo	Función principal
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.
Administración de errores.	Dificultan el trabajo diario.

Nota. Elaboración propia

Comunicación con el sistema DAQ

La HMI se conecta vía UART/USB al sistema de adquisición de datos para establecer la comunicación. El pc con el código fuente se le ha llamado código fuente pues allá se inserta el modem del es a un pc por medio de tres cables seriales y se usa un monitor serial para recoger la telemetría de nuestro esp.

El software tiene una velocidad de 115200 baudios y un tiempo de espera leve para que la comunicación sea estable. Esta configura-ción nos permite obtener los datos de forma continua sin bloquear la GUI. El programa también te permite detectar el puerto serial donde está conectado el computador con el uC.

La lectura de datos se ejecuta de forma periódica mediante un ciclo no bloqueante. En lugar de utilizar un ciclo infinito que congele la interfaz, se emplea una actualización programada cada cierto intervalo de tiempo. Esto permite que la HMI continúe respondiendo a las acciones del usuario mientras recibe y procesa información del banco.

Procesamiento de datos fotovoltaicos

Una vez recibida la trama serial, el software separa los datos mediante el carácter coma, valida que la trama esté completa y convierte cada valor a formato numérico. La

validación resulta fundamental, ya que permite evitar que se procesen datos corruptos o incompletos que pueden dar lugar a errores en las gráficas y en el archivo de resultados.

Principales cálculos realizados por la HMI es la potencia instantánea del panel fotovoltaico, obtenido por la relación de voltaje y corriente:

$$P_i = V_i I_i$$

- Pi representa la potencia instantánea del panel (en W).
- El voltaje que fue medido en el instante i es el vi.
- Ii es la corriente medida en el instante i.

Utilizando esta información el software identifica el pmu que de forma continuada realiza la comparación de los valores calculados:

$$P_{max} = \max(P_i)$$

Este procedimiento permite que la HMI registre el máximo de potencia alcanzada durante el ensayo, así como el voltaje y la corriente de ese máximo. The system allows obtaining fundamental parameters like Voc, Isc, Pmax, Vmp and Imp, required for the experimental characterization of the photovoltaic panel.

Visualización de curvas I-V y P-V

La HMI puede presentar las gráficas I-V y P-V en tiempo real del equipo. Las curvas nos ayudarán a poder analizar y estudiar el comportamiento del panel que se estudia durante el barrido de carga que fue realizado con el reóstato.

La curva I-V muestra cómo varía la corriente que entrega el panel en función del voltaje. Por otro lado, la curva P-V permite ver el punto en que la potencia tiene el valor máximo. Para mejorar la lectura de la información, el sistema se basa en el uso de ejes independientes, uno para corriente y el otro para potencia. Con esto, logra representar ambas variables de forma clara y concisa dentro de la misma ventana de análisis.

El gráfico se actualiza modificando directamente los datos de las líneas, sin un redibujo total de la figura.

$$linea.set_data(V, I)$$

$$canvas.draw_idle$$

Con esto, el software mantiene una visualización fluida y permite observar el comportamiento del panel conforme avanza el ensayo.

Almacenamiento de datos experimentales

El sistema HMI almacena los datos obtenidos durante la prueba en archivos Excel. Para evitar bloqueos durante la adquisición, los datos se guardan primero en una memoria temporal interna y posteriormente se exportan al archivo seleccionado por el usuario.

Cada registro incluye una marca de tiempo y los valores medidos o calculados durante el ensayo. Esto permite conservar trazabilidad entre las variables eléctricas, térmicas y ambientales del banco.

Tabla 18

Datos almacenados por la HMI

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

Nota. Elaboración propia

La exportación en Excel facilita el análisis posterior de los datos, la elaboración de tablas, la comparación entre configuraciones y la validación experimental del banco de ensayos.

Seguridad y confiabilidad del software

El software fue diseñado con mecanismos de control para evitar fallos durante la operación donde la lectura serial el procesamiento de datos y el guardado de archivos se ejecutan dentro de bloques de manejo de errores lo que esto permite que si ocurre una desconexión del puerto una trama incompleta o un archivo Excel abierto el programa no se cierre de forma inesperada.

Además, antes de iniciar una nueva prueba el sistema limpia los datos almacenados en memoria para evitar que los resultados de un ensayo anterior se mezclen con los nuevos por tanto esta limpieza incluye los buffers de datos, las curvas graficadas y los valores máximos calculados.

Tabla 19

Medidas de confiabilidad implementadas en la HMI

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

Nota. Elaboración propia

El sistema HMI desarrollado permite integrar el banco de ensayos fotovoltaico con el sistema de adquisición de datos, proporcionando una herramienta funcional para supervisar las variables del ensayo, calcular parámetros eléctricos, generar curvas características y almacenar resultados experimentales.

Desde un punto de vista mecatrónico, no solo se trata de una HMI «visual», sino que forma parte del sistema de control y validación del banco. El desarrollo hecho permite que el hardware de medición esté conectado con el análisis experimental. Se asegura que el voltaje, la corriente, la temperatura y la irradiancia sean recibidos, procesados y registrados.

La HMI es un elemento importante en el banco de pruebas, dado que permite transformar la información recibida por el ESP32 en datos técnicos para evaluar el comportamiento que presentan los paneles fotovoltaicos.

Capítulo IV

Resultados

Validación experimental del banco de ensayos.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la etapa de calibración, construcción e integración del banco de ensayos fotovoltaico. La validación del sistema se desarrolló considerando los subsistemas principales del proyecto: medición de variables físicas, adquisición de datos, estructura mecánica, tablero eléctrico, acondicionamiento de señales y software HMI.

La primera parte del capítulo corresponde a la calibración del sistema de medición. Esta etapa fue necesaria debido a que las lecturas entregadas por los sensores no deben ser utilizadas únicamente como valores crudos, sino como variables corregidas mediante ecuaciones de ajuste. Por esta razón, se calibraron los sensores de temperatura, voltaje, corriente e irradiancia, con el fin de reducir errores sistemáticos y mejorar la confiabilidad de los datos utilizados en la caracterización de los módulos fotovoltaicos.

Posteriormente se presentan los resultados de implementación de las ecuaciones de corrección en el sistema de adquisición de datos donde esta integración permitió que las variables procesadas por la HMI correspondan a valores ajustados experimentalmente lo cual resulta fundamental para el cálculo de potencia con generación de curvas I-V y P-V y almacenamiento de datos en Excel.

Al final se muestran los resultados de construcción e integración del banco de ensayos, considerando el montaje mecánico, eléctrico, electrónico y computacional ya que con ello se verifica que el sistema diseñado no solo cumple con su función estructural y eléctrica sino también con la adquisición, visualización y registro de datos experimentales.

Resultados de calibración del sistema de medición

La calibración del sistema de medición se realizó sobre las principales variables empleadas en el banco de ensayos: Cada variable fue tratada de acuerdo con el sensor utilizado, el tipo de señal generada y la etapa de acondicionamiento implementada antes de su ingreso al sistema de adquisición de datos.

El objetivo de la calibración fue obtener ecuaciones de corrección que permitan transformar las lecturas medidas en valores más cercanos al patrón o referencia utilizada. De esta manera, las mediciones registradas por el banco no dependen únicamente de la respuesta nominal de cada sensor, sino de un ajuste experimental obtenido en condiciones controladas.

Tabla 20

Variables consideradas en el proceso de calibración

Variable	Sensor o circuito utilizado	Canal de lectura	Magnitud corregida
Temperatura ambiente exterior	DS18B20	ESP32	°C
Temperatura panel 1	DS18B20 C1-C5	ESP32	°C
Temperatura panel 2	DS18B20 C1-C5	ESP32	°C
Voltaje panel 1	Divisor resistivo + ADS1115	A0	V
Voltaje panel 2	Divisor resistivo + ADS1115	A1	V
Corriente panel 1	ACS712-20A + ADS1115	A2	A
Corriente panel 2	ACS712-20A + ADS1115	A3	A
Irradiancia solar	NovaLynx CMP3 + acondicionador	ADC ESP32	W/m²

Nota. Elaboración propia.

Calibración de sensores de temperatura DS18B20

La calibración de temperatura se realizó sobre once sensores digitales DS18B20 instalados en el banco de ensayos. El sistema térmico quedó conformado por cinco sensores distribuidos sobre el panel 1, cinco sensores distribuidos sobre el panel 2 y un sensor destinado a la medición de la temperatura ambiente exterior. La identificación individual de cada sensor se realizó mediante su código único, lo cual permite asociar cada ecuación de corrección con su ubicación física dentro del banco.

Tabla 21

Identificación de sensores DS18B20 calibrados

Sensor	Ubicación en el banco	Código único
Sensor ambiente exterior	Temperatura ambiente exterior	284E075900000062
Panel 1 C1	Panel fotovoltaico 1	2809BD5900000060
Panel 1 C2	Panel fotovoltaico 1	28D43BBD000000FE
Panel 1 C3	Panel fotovoltaico 1	28060E54000000D8

Panel 1 C4	Panel fotovoltaico 1	28F6F15600000064
Panel 1 C5	Panel fotovoltaico 1	28FF1A5200000056
Panel 2 C1	Panel fotovoltaico 2	28A54B56000000E1
Panel 2 C2	Panel fotovoltaico 2	28B44854000000C4
Panel 2 C3	Panel fotovoltaico 2	28AE3952000000F9
Panel 2 C4	Panel fotovoltaico 2	281E475000000036
Panel 2 C5	Panel fotovoltaico 2	28D1E852000000D6

Nota. Elaboración propia con base en el registro de identificación de sensores DS18B20.

El procedimiento de calibración se desarrolló mediante el método de comparación tomando como referencia la norma ASTM E220 para calibración por comparación, la ASTM E563 para la preparación del baño de punto de hielo y la ISO/IEC 17025 como criterio parcial de buenas prácticas de calibración así la calibración se realizó en tres puntos como punto de hielo, punto intermedio y punto superior cercano a 50 °C donde para cada punto se tomaron 20 muestras con intervalo de 2 s obteniendo un tiempo total de registro de 40 s por condición de ensayo.

El promedio de cada punto de calibración se calculó mediante:

$$T_{prom} = \frac{\sum T_i}{20}$$

El error de medición se determinó como la diferencia entre el valor promedio del sensor y el valor de referencia del patrón:

$$\mathrm{E} = \mathrm{T_{prom}} - \mathrm{T_{ref}}$$

Posteriormente, para cada sensor se obtuvo una ecuación de corrección mediante regresión lineal de tres puntos:

$$T_{corr} = aT_{sensor} + b$$

Donde Tcorr corresponde a la temperatura corregida, Tsensor es la lectura original del DS18B20, a representa la ganancia o factor de escala, y b corresponde al ajuste de desplazamiento u offset.

Tabla 22

Promedios utilizados para la calibración de los sensores DS18B20

Sensor	Punto bajo: sensor / patrón (°C)	Punto intermedio: sensor / patrón (°C)	Punto alto: sensor / patrón (°C)
Ambiente exterior	0.000 / 0.000	25.250 / 26.065	49.000 / 50.300
Panel 1 C1	-0.250 / 0.000	25.250 / 26.065	48.880 / 50.300
Panel 1 C2	-0.275 / 0.000	26.419 / 27.600	48.581 / 50.105
Panel 1 C3	1.900 / 0.000	26.500 / 27.600	48.625 / 50.105
Panel 1 C4	-0.125 / 0.000	26.625 / 27.600	48.763 / 50.105
Panel 1 C5	-0.219 / 0.000	26.500 / 27.600	48.738 / 50.105
Panel 2 C1	-0.130 / 0.000	25.237 / 26.065	49.000 / 50.300
Panel 2 C2	-0.250 / 0.000	26.625 / 27.745	48.519 / 50.100
Panel 2 C3	-0.263 / 0.000	26.625 / 27.745	48.500 / 50.100
Panel 2 C4	-0.256 / 0.000	26.631 / 27.745	48.625 / 50.100
Panel 2 C5	-0.125 / 0.000	26.750 / 27.745	48.869 / 50.100

Nota. Elaboración propia con base en los registros experimentales de calibración de los sensores DS18B20.

Los resultados muestran que los sensores presentaban desviaciones iniciales propias de su fabricación, conexión y ubicación dentro del sistema. En la mayoría de los casos, el error

inicial se manifestó como una lectura menor que la referencia, especialmente en los puntos intermedio y alto. Esta condición justificó la implementación de una corrección individual por sensor, en lugar de utilizar una sola ecuación general para todos los DS18B20.

Tabla 23.

Ecuaciones de corrección obtenidas para los sensores DS18B20

Sensor	**Pendiente a**	**Intercepto b**	**Ecuación de corrección**
Ambiente exterior	1.0265	0.0468	Tcorr es igual a 1.026Tsensor más 0.046.
Panel 1 C1.	1.0237	0.242	Tcorr = 1.023Tsensor + 0.242.
Panel C2 Nº 1.	1.0258	0.349	Tcorr = 1.025Tsensor + 0.349 l
Panel C3 1	1.0732	-1.654	Tcorr = 1.073 Tsensor – 1.654
Panel 1 C4.	1.0251	0.183	Tcorr = T dopado + 0.183
Panel 1 C5	1.0237	0.300	Tcorr es igual a 1.023Tsensor más 0.300.
Panel 2 C1.	1.0238	0.163	Tcorr = 1,023Tsensor + 0,163.
Panel 2 C2.	1.0274	0.297	Tcorr es igual a 1.027Tsensor mas 0.297.
Panel 2 C3 2	1.0275	0.305	Tcorr = 1.027Tsensor +0.305.
Panel 2 C4.	1.0251	0.318	Tcorr=1.025Tsensor+0.318.
Panel 2 C5.	1.0229	0.206	Tcorr es igual a 1,022 por Tsensor más 0,206.

Nota. Elaboración propia a partir del ajuste lineal aplicado a los tres puntos de calibración de cada sensor.

Para verificar la efectividad de la calibración, se comparó el error máximo absoluto antes y después de aplicar la ecuación de corrección. El criterio de aceptación considerado para el procedimiento fue un error máximo permitido de ±1 °C y un error deseado de ±0.5 °C.

Tabla 24

Comparación del error máximo antes y después de la calibración

Sensor	Error máximo antes de calibración (°C)	Error máximo después de calibración (°C)	Coeficiente R^2	Evaluación
Ambiente exterior	1.300	0.097	0.999	Cumple
Panel 1 C1	1.420	0.028	0.999	Cumple
Panel 1 C2	1.524	0.149	0.999	Cumple
Panel 1 C3	1.900	0.813	0.999	Cumple
Panel 1 C4	1.343	0.122	0.999	Cumple
Panel 1 C5	1.368	0.169	0.999	Cumple
Panel 2 C1	1.300	0.063	0.999	Cumple
Panel 2 C2	1.581	0.091	0.999	Cumple
Panel 2 C3	1.600	0.080	0.999	Cumple
Panel 2 C4	1.475	0.124	0.999	Cumple
Panel 2 C5	1.231	0.175	0.999	Cumple

Nota. Elaboración propia con base en los registros de calibración y ajuste lineal de los sensores DS18B20.

Los resultados evidencian que la calibración redujo el error de todos los sensores. Antes de la corrección el mayor error absoluto se presentó en el sensor Panel 1 C3 con una desviación de 1.900 °C ya que después de aplicar la ecuación de calibración el error máximo de este sensor disminuyó a 0.813 °C manteniéndose dentro del criterio de aceptación de ±1 °C.

En los demás sensores el error posterior a la calibración fue inferior a 0.175 °C lo que indica una mejora significativa de la lectura térmica asimismo todos los coeficientes de determinación fueron superiores a 0.999 confirmando una relación prácticamente lineal entre las lecturas de los sensores y los valores de referencia.

Desde el punto de vista del banco de ensayos esta calibración es importante porque la temperatura influye directamente en el comportamiento eléctrico de los módulos fotovoltaicos donde una lectura térmica no corregida puede afectar la interpretación de la potencia generada, la comparación entre paneles y el análisis de desempeño bajo diferentes condiciones de irradiancia.

Las ecuaciones obtenidas fueron implementadas individualmente en el sistema de adquisición de datos, de manera que cada sensor DS18B20 entregue una temperatura corregida según su propia respuesta experimental. Con esto, el banco de ensayos dispone de una medición térmica más confiable para registrar la temperatura ambiente exterior y la distribución térmica sobre la superficie posterior de ambos módulos fotovoltaicos.

Calibración del sistema de medición de voltaje

La medición de voltaje se realizó mediante divisores resistivos conectados a los canales A0 y A1 del convertidor ADS1115. Cada canal corresponde a la medición de voltaje de un panel fotovoltaico. El circuito de acondicionamiento utiliza resistencias de 150 kΩ y 10 kΩ, junto con un filtro pasa bajos de 100 nF, con el fin de adaptar la tensión del panel al rango seguro de entrada del ADC.

El ADS1115 fue configurado con un rango de escala completa de ±4.096 V, resolución equivalente a 125 µV/bit y tasa de muestreo de 128 SPS. Para la calibración de voltaje se establecieron 11 puntos entre 0 V y 30 V, tomando 10 lecturas filtradas por cada punto.

La conversión inicial de lectura digital a voltaje en el ADC se definió como:

$$\mathrm{V_{ADC}} = \mathrm{ADC} \cdot 0.000125$$

Luego, debido al divisor resistivo, el voltaje medido del panel se recupera mediante:

$$V_{medido} = V_{ADC}\left(\frac{150 + 10}{10}\right)$$

Por tanto:

$$V_{medido} = 16V_{ADC}$$

A partir de las hojas de calibración de voltaje, se obtuvo un ajuste lineal para cada canal. Las ecuaciones finales de corrección fueron:

$$V_{A0,corr} = 1.013475167V_{A0,medido} - 0.015$$

$$V_{A1,corr} = 1.002521936V_{A1,medido} - 0.015$$

Tabla 25

Ecuaciones de corrección para medición de voltaje

Canal	Variable medida	Pendiente	Intercepto	Ecuación de corrección
A0	Voltaje panel 1	1.0134	-0.015	VA0,corr = 1.013,medido - 0.015
A1	Voltaje panel 2	1.002	-0.015	VA1,corr = 1.002,medido - 0.015

Nota. Elaboración propia con base en los resultados experimentales de calibración de voltaje.

La corrección obtenida muestra que ambos canales presentan una respuesta lineal, pero con pequeñas diferencias de ganancia y desplazamiento. En el caso del canal A0, la pendiente mayor a la unidad indica que la lectura medida requería un ligero aumento proporcional para aproximarse al valor patrón. En el canal A1, la pendiente se mantiene muy cercana a uno, lo que indica una respuesta más próxima al comportamiento ideal del sistema de medición.

Calibración del sistema de medición de corriente

La corriente de los paneles se midió mediante sensores ACS712-20A, cuyas salidas fueron conectadas a los canales A2 y A3 del ADS1115. Estos sensores entregan una señal analógica proporcional a la corriente medida, con un valor central cercano a 2.5 V para corriente nula. Antes de ingresar al ADC, la señal fue acondicionada mediante un divisor de 4.7 kΩ y 10 kΩ, junto con un filtro pasa bajos de 100 nF.

El protocolo de calibración de corriente consideró inicialmente la determinación del punto cero, desconectando el lazo de potencia para obtener el valor de referencia sin corriente. Posteriormente, se establecieron puntos de carga en 0.8 A, 1.6 A, 2.4 A y 3.2 A, tomando 10 lecturas por cada punto.

La señal del ACS712 se reconstruyó primero como voltaje y posteriormente se transformó en corriente mediante:

$$I_{medido} = \frac{V_{medido} - 2.5}{0.1}$$

Donde Vmedido corresponde al voltaje reconstruido de salida del sensor, 2.5 V representa el offset teórico del ACS712 para corriente nula y 0.1 V/A corresponde a la sensibilidad del sensor de 20 A.

A partir de las hojas de calibración de corriente, se obtuvieron las siguientes ecuaciones de ajuste:

$$I_{A2,corr} = 1.004484283 I_{A2,medido} - 0.225704892$$

$$I_{A3,corr} = 0.993317161 I_{A3,medido} - 0.212911717$$

Tabla 26

Ecuaciones de corrección para medición de corriente

Canal	Variable medida	Pendiente	Intercepto	Ecuación de corrección
A2	Corriente panel 1	1.004	-0.225	IA2,corr = 1.004,medido - 0.225
A3	Corriente panel 2	0.993	-0.212	IA3,corr = 0.993,medido - 0.212

Nota. Elaboración propia

La presencia de un intercepto negativo en ambos canales evidencia la existencia de un desplazamiento inicial asociado al sensor y al acondicionamiento analógico. Por esta razón, la ecuación de corrección no solo ajusta la ganancia de la lectura, sino que también compensa el error de offset. Esta corrección resulta importante para el cálculo de potencia, debido a que un pequeño error en corriente puede alterar directamente la curva P-V y el valor de potencia máxima obtenido durante el ensayo.

Calibración del piranómetro NovaLynx CMP3

La calibración del piranómetro NovaLynx CMP3 se realizó mediante comparación experimental en campo frente a un piranómetro Apogee MP-200 utilizado como referencia operativa. El procedimiento se fundamentó en la metodología de comparación en campo descrita por la ISO 9847 considerando además criterios de la ISO 9060 y buenas prácticas de la Guía WMO No. 8.

Los sensores se instalaron en el mismo plano, nivelados y sin sombras donde las mediciones se realizaron durante tres días consecutivos, entre las 10:00 y las 13:00 horas, con un intervalo de muestreo de 30 segundos. Posterior, las series fueron depuradas para eliminar registros incompletos y pares no sincronizados así la relación entre la lectura del NovaLynx y la referencia Apogee se obtuvo mediante regresión lineal del tipo:

$$G_{ref} = aG_{NovaLynx} + b$$

Los resultados principales de la calibración fueron los siguientes:

Tabla 27

Resultados de calibración comparativa del piranómetro NovaLynx CMP3

Parámetro	**Resultado**
Pares sincronizados	1675
Pares utilizados	1081
Coeficiente de determinación R^2	0.926
RMSE antes de corrección	96.75 W/m²
RMSE después de corrección	63.55 W/m²

*Nota***.** Elaboración propia con base en la calibración comparativa del piranómetro.

El RMSE antes de la corrección representa la raíz del error cuadrático medio de las lecturas crudas del piranómetro NovaLynx CMP3 respecto al Apogee MP-200. Luego de aplicar la ecuación de calibración, el RMSE disminuyó de 96.75 W/m² a 63.55 W/m² lo que representa una reducción aproximada del 34.31 % del error. Este resultado evidencia que la ecuación obtenida mejora la respuesta del piranómetro y permite utilizar una lectura de irradiancia corregida dentro del sistema de adquisición de datos.

La ecuación final de corrección obtenida fue:

$$G_{corr} = 0.848998 G_{NovaLynx} + 37.841$$

Para su implementación en el sistema de adquisición, la ecuación puede escribirse como:

$$\text{radiacion}_{\text{c}}\text{orregida} = 0.848998 * \text{radiacion} + 37.841$$

El valor de $R^2 = 0.9264$ indica una correlación lineal fuerte entre ambos instrumentos. Además, la reducción del RMSE de 96.75 W/m² a 63.55 W/m² evidencia que la corrección mejora la concordancia de la lectura del NovaLynx respecto a la referencia operativa.

Es importante señalar que esta calibración corresponde a una comparación experimental de campo y no reemplaza una calibración metrológica trazable con patrón certificado, pero para el alcance académico y experimental del banco de ensayos la ecuación obtenida permite corregir la lectura de irradiancia y mejorar la calidad de los datos utilizados en la caracterización fotovoltaica.

Implementación de ecuaciones de corrección en el sistema DAQ

Una vez obtenidas las ecuaciones de calibración, estas fueron incorporadas en el procesamiento del sistema de adquisición de datos. En consecuencia, las lecturas sin procesar del ADS1115, los sensores ACS712-20A, los DIVISORES RESISTIVOS, los SENSORES DS18B20 y el piranómetro NovaLynx CMP3 son sometidos a transformaciones que las convierten en variables corregidas, permite su utilización por la HMI.

Desde el punto de vista del procesamiento, el sistema DAQ trabaja en tres etapas: adquisición de la lectura cruda, conversión a magnitud física y aplicación de la ecuación de corrección. Esta secuencia permite que los datos enviados al computador representen valores ajustados experimentalmente.

$$Lectura\ Base\ \rightarrow Conversión\ Física\ \rightarrow Corrección\ Experimental\ \rightarrow Envío\ a\ HMI$$

Para el caso del voltaje, el sistema primero convierte el valor digital del ADS1115 a voltaje de entrada del ADC. Luego aplica el factor del divisor resistivo y finalmente la ecuación de calibración del canal correspondiente:

$$V_{ADC} = ADC \cdot 0.000125$$

$$V_{medido} = 16V_{ADC}$$

$$V_{corr} = aV_{medido} + b$$

Para la corriente, el sistema reconstruye el voltaje del ACS712, calcula la corriente medida y aplica la ecuación de corrección experimental:

$$I_{medido} = \frac{V_{medido} - 2.5}{0.1}$$

$$I_{corr} = aI_{medido} + b$$

Para la irradiancia, la lectura obtenida del piranómetro se corrige directamente mediante la ecuación comparativa obtenida en campo:

$$G_{corr} = 0.848998G_{NovaLynx} + 37.8416$$

En el caso de temperatura, el modelo de corrección se mantiene mediante una relación lineal individual para cada sensor:

$$T_{corr} = aT_{sensor} + b$$

Tabla 28

Ecuaciones implementadas en el sistema DAQ

Variable	Canal / sensor	Ecuación implementada
Voltaje panel 1	ADS1115 A0	VA0,corr = 1.013,measured - 0.015.
Voltaje panel 2	ADS1115 A1.	VA1,corr = 1.002, measured - 0.015.
Corriente panel 1	ACS712 / A2.	IA2,corr = 1.004,measured - 0.225.
Corriente panel 2	ACS712 / A3.	IA3 corr measured 0.993 - 0.212.
Irradiancia	NovaLynx CMP3.	Gcorr = 0,848GNovaLynx + 37,8416.

Temperatura	DS18B20	Tcorr es igual a aTsensor más b.

Nota. Elaboración propia.

La implementación de estas ecuaciones permite que el sistema HMI trabaje con variables corregidas y no únicamente con lecturas directas del hardware por esto mejora la consistencia de los resultados en especial en el cálculo de potencia instantánea:

$$P_i = V_i I_i$$

Al utilizar voltaje y corriente corregidos la potencia calculada representa de mejor manera el comportamiento real del panel ensayado.

En términos de validación del banco, esta etapa constituye el enlace entre la calibración de sensores y la operación completa del sistema. Las ecuaciones de corrección permiten que el sistema DAQ, el microcontrolador y la HMI funcionen como una cadena de medición calibrada, capaz de entregar datos útiles para el análisis experimental de los módulos fotovoltaicos.

Resultados de construcción e integración del banco

La construcción e integración del banco de ensayos permitió materializar los subsistemas diseñados en la etapa metodológica: estructura mecánica, tablero eléctrico, sistema de adquisición de datos y software HMI. La validación de esta etapa se realizó mediante inspección física, verificación de montaje, conexión de sensores y comprobación funcional de la interfaz de usuario.

El banco quedó conformado por dos módulos fotovoltaicos, estructura metálica con ajuste angular, reóstatos de carga, tablero eléctrico de control y protección, sistema DAQ basado en ESP32 y una HMI desarrollada en Python para visualización, adquisición y almacenamiento de datos.

Tabla 29

Subsistemas integrados en el banco de ensayos

Subsistema	Resultado implementado	Evidencia
Mecánico	Estructura metálica con soporte para dos paneles y ajuste angular	Anexos 21 y 22
Eléctrico	Tablero de potencia, protecciones, fuente y conmutación por disyuntores	Anexo 23
Electrónico / DAQ	ESP32, ADS1115, ACS712, DS18B20 y acondicionador del piranómetro	Anexos 24 y 25
Software HMI	Interfaz gráfica para modos individual, serie y paralelo	Anexos 27 al 44
Almacenamiento	Registro de datos experimentales en archivos Excel	Anexos 45 al 47

Nota. Elaboración propia

Construcción mecánica

La estructura mecánica del banco fue construida para soportar dos paneles fotovoltaicos ARCO de 43 W, permitiendo su exposición directa a la radiación solar durante los ensayos donde el sistema se implementó sobre una base metálica rígida con soportes inclinables para cada panel y espacio destinado al tablero eléctrico.

El mecanismo de inclinación permitió posicionar los módulos en diferentes ángulos de ensayo manteniendo la estabilidad del conjunto durante la adquisición de datos donde esta característica fue necesaria para evaluar el comportamiento eléctrico de los paneles bajo distintas condiciones de incidencia solar.

La construcción final del banco se presenta en los Anexos 21 y 22. En estos anexos se observa la disposición de los dos paneles, la estructura de soporte, el área de carga resistiva y la ubicación del tablero eléctrico dentro del conjunto.

Tabla 30

Verificación de construcción mecánica del banco.

Elemento verificado	Resultado
Montaje de dos paneles fotovoltaicos	Conforme
Soporte estructural metálico	Conforme
Ajuste manual de inclinación	Conforme
Ubicación de reóstatos de carga	Conforme
Espacio para tablero eléctrico	Conforme
Operación en exterior	Conforme

Nota. Elaboración propia

Montaje eléctrico y tablero

La instalación eléctrica fue llevada a cabo en un gabinete metálico de 60 × 40 × 30 cm, código IP65. El sistema de electricidad fue previsto para una potencia de hasta 40 VDC en serie, una tensión de servicio de 110 VAC/60 Hz y unos auxiliares de control de 12 VDC, 5 VDC y 3.3 VDC.

Se estructuró por espacios funcionales el tablero en su interior. La zona superior contiene los elementos de protección de potencia, la zona intermedia agrupa los disyuntores de maniobra para las configuraciones individual, serie y paralelo, y la zona inferior aloja la fuente auxiliar, el acondicionador del piranómetro y el sistema DAQ. Esta distribución permite separar la etapa de potencia de la etapa de adquisición de datos.

El tablero implementado se presenta en el Anexo 23. Los esquemas de alimentación auxiliar, distribución de tensiones y características nominales del sistema se presentan en los Anexos 24, 25 y 26.

Tabla 31

Características eléctricas generales del tablero.

Parámetro	Valor implementado
Dimensión del tablero	60 × 40 × 30 cm

Parámetro	Valor implementado
Grado de protección	IP65
Tensión nominal de potencia	40 VDC
Tensión de servicio	110 VAC / 60 Hz
Tensiones de control	12 VDC / 5 VDC / 3.3 VDC
Corriente nominal de referencia	8 A en configuración paralelo
Tipo de maniobra	Disyuntores y lógica cableada
Configuraciones disponibles	Individual, serie y paralelo

Nota. Elaboración propia

Tabla 32

Componentes principales instalados en el tablero

Componente	Función
Fusibles gPV	Protección contra sobrecorriente en líneas fotovoltaicas
Breakers DC	Maniobra y seccionamiento de los paneles
DPS DC	Protección contra sobretensiones
Fuente 12 VDC	Alimentación principal del sistema auxiliar
Convertidores LM2596	Regulación a 5 VDC y 3.3 VDC
Borneras	Interconexión de potencia y señales
Acondicionador del piranómetro	Adaptación de señal de irradiancia
Unidad DAQ ESP32	Adquisición y transmisión de datos

Nota. Elaboración propia

La configuración eléctrica permite habilitar las condiciones de ensayo sin utilizar selectores o relés de potencia donde la conmutación se realiza mediante disyuntores

reduciendo la complejidad del sistema y facilitando la operación manual durante las prácticas de laboratorio.

Integración del sistema DAQ

El sistema de adquisición de datos se integró mediante un microcontrolador ESP32 como unidad principal de procesamiento donde esta unidad recibe las señales provenientes de los sensores eléctricos, térmicos y ambientales y transmite los datos hacia la computadora mediante comunicación UART/USB.

Para la medición de voltaje y corriente se utilizó el convertidor analógico-digital ADS1115 conectado al ESP32 mediante comunicación I2C donde los canales analógicos se destinaron a la lectura de los divisores resistivos de voltaje y de los sensores de corriente ACS712-20ª por tanto la medición de temperatura se realizó con once sensores DS18B20 conectados mediante bus 1-Wire distribuidos en ambos paneles y en el ambiente exterior.

La señal del piranómetro NovaLynx CMP3 fue ingresada al sistema por medio de su acondicionador de señal, alimentado desde la rama de 12 VDC. Las ramas auxiliares de 5 VDC y 3.3 VDC se obtuvieron mediante convertidores DC-DC LM2596, empleados para alimentar sensores y electrónica de adquisición.

Tabla 33

Integración de sensores y señales en el sistema DAQ

Variable	**Elemento de medición**	**Etapa de adquisición**
Voltaje panel 1	Divisor resistivo	ADS1115
Voltaje panel 2	Divisor resistivo	ADS1115
Corriente panel 1	ACS712-20A	ADS1115
Corriente panel 2	ACS712-20A	ADS1115
Temperatura panel 1	5 sensores DS18B20	ESP32 / 1-Wire

Variable	Elemento de medición	Etapa de adquisición
Temperatura panel 2	5 sensores DS18B20	ESP32 / 1-Wire
Temperatura ambiente exterior	DS18B20	ESP32 / 1-Wire
Irradiancia solar	NovaLynx CMP3 + acondicionador	ESP32

Nota. Elaboración propia

La arquitectura general del sistema DAQ se resume mediante la siguiente relación funcional:

$$Sensores \rightarrow Acondicionamiento\ de\ señal \rightarrow DAQ\ ESP32/ADS1115 \rightarrow HMI \rightarrow Excel$$

La integración del DAQ permitió centralizar la medición de las variables requeridas para la caracterización fotovoltaica. Además, al emplear una comunicación directa con la HMI, los datos pudieron visualizarse y almacenarse durante los ensayos.

Implementación de la HMI

La HMI fue desarrollada en Python como una interfaz de escritorio para guiar la operación del banco de ensayos, visualizar variables, generar curvas I-V y P-V y almacenar datos experimentales en archivos Excel por tanto la interfaz se estructuró en tres modos principales de operación como la caracterización individual, evaluación en paralelo y evaluación en serie.

El menú principal permite seleccionar el tipo de ensayo que se desea ejecutar. Cada modo incluye pantallas de fundamentos de la práctica, guía de conexión, secuencia de energización, determinación experimental de Voc e Isc, visualización de sensores y adquisición de curvas. La pantalla principal de la HMI se presenta en el Anexo 27.

Tabla 34

Pantallas implementadas en la HMI.

Modo	Pantallas implementadas	Evidencia
Particular	Menú, fundamentos, energización, conexión DAQ, curvas I-V/P-V, Voc-Isc y sensores.	Anexos 28 al 34
Paralelo	Menú, mediciones fundamentales, energización, Voc-Isc y sensores	Anexos 35 al 39
Serie	Menú, mediciones fundamentales, energización, Voc-Isc y sensores	Anexos 40 al 44

Nota. Elaboración propia

La HMI incorpora comunicación serial con el módulo DAQ mediante puerto USB donde el software valida la trama recibida antes de procesarla evitando que lecturas incompletas sean utilizadas en los cálculos. La estructura de datos se procesa en tiempo real para actualizar las variables de pantalla, calcular potencia instantánea y construir las curvas características.

La potencia instantánea se calcula mediante:

$$P_i = V_i I_i$$

Se encuentra el máximo valor de barrido y se verifica el valor real de la carga:

$$P_{max} = \max(V_i I_i)$$

Para el almacenamiento el sistema genera archivos en formato Excel con las variables medidas y calculadas por ende esta función permite conservar los datos experimentales de cada ensayo para su posterior análisis.

Tabla 35

Funciones principales implementadas en la HMI

Función	Resultado implementado
Selección de modo de ensayo	Individual, serie y paralelo
Guía de operación	Secuencia de conexión y energización
Comunicación con DAQ	UART/USB
Visualización de variables	Voltaje, corriente, irradiancia y temperatura
Cálculo de potencia	Potencia instantánea y potencia máxima
Generación de curvas	Curvas I-V y P-V
Registro de datos	Exportación a Excel

Nota. Elaboración propia

La implementación de la HMI permitió integrar la operación del banco en una herramienta única de supervisión. De esta forma, el usuario puede ejecutar el ensayo, visualizar el comportamiento eléctrico y térmico de los paneles, y registrar los datos sin recurrir a mediciones manuales independientes.

Pruebas funcionales del banco de ensayos

Las pruebas funcionales se desarrollaron los días 14, 15 y 16 de julio de 2026; en cada jornada se ejecutaron dos repeticiones para las configuraciones individual, serie y paralelo. En el modo individual se evaluaron inclinaciones de 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40° y 45°, manteniendo la misma secuencia operativa para ambos módulos fotovoltaicos.

La ejecución se realizó conforme a la Guía Técnica preparada para la operación del banco se consideró la exposición previa de los módulos a las condiciones ambientales, la medición de voltaje en circuito abierto, la medición de corriente en cortocircuito y en la configuración individual, el barrido de carga mediante los reóstatos donde el sistema registró

una muestra cada 2 s; las variables eléctricas, térmicas y ambientales fueron procesadas por el DAQ y almacenadas en archivos Excel.

Tabla 36

Campañas experimentales ejecutadas para la validación funcional

Fecha	Repeticiones	Configuraciones evaluadas	Inclinaciones en modo individual	Archivos generados
14/07/2026	2	Individual, serie y paralelo	15° a 45°	6
15/07/2026	2	Individual, serie y paralelo	15° a 45°	6
16/07/2026	2	Individual, serie y paralelo	15° a 45°	6
Total	6 por configuración	Tres configuraciones	Siete posiciones angulares	18

*Nota***.** Elaboración propia a partir de los registros experimentales generados por la HMI. Las campañas conservaron la misma secuencia de medición durante los tres días.

Prueba de alimentación y protecciones

La prueba de alimentación se efectuó con el banco completamente conectado; se verificó la tensión de entrada y las salidas destinadas a la fuente principal, el ESP32, el ADS1115 y los circuitos auxiliares. Los valores obtenidos se compararon con los niveles nominales definidos en el diseño eléctrico.

El error relativo se determinó mediante:

$$E_r = \frac{|V_{medido} - V_{nominal}|}{V_{nominal}} \times 100$$

Tabla 37

Resultados de la verificación de las tensiones de alimentación.

Punto de medición	Valor nominal	Valor medido	Desviación relativa
Entrada de red	110 VAC	112 VAC	1.818 %
Fuente principal	12 VDC	12.250 VDC	2.083 %
Salida regulada	5 VDC	5.140 VDC	2.800 %
Salida regulada	3.3 VDC	3.330 VDC	0.909 %

Nota. Elaboración propia con base en las mediciones realizadas con multímetro.

La mayor diferencia se presentó en la salida de 5 VDC con una desviación de 2.800 %; aun así los cuatro niveles permanecieron próximos a sus valores nominales y permitieron energizar los subsistemas electrónicos. Durante esta verificación no se indujeron cortocircuitos ni sobretensiones de manera intencional por tanto se comprobó la instalación y la operación normal de fusibles, interruptores y dispositivos de protección pero no sus curvas específicas de disparo.

Prueba de comunicación ESP32-HMI

La comunicación entre el ESP32 y la HMI se verificó mediante una conexión UART a través del puerto USB. El módulo DAQ transmitió una trama con 16 variables cada 2000 ms; posteriormente, la aplicación validó la cantidad de parámetros recibidos, convirtió los datos a unidades de ingeniería y actualizó las pantallas correspondientes al modo de ensayo seleccionado.

Tabla 38

Medidas verificados durante la comunicación ESP32-HMI

Parámetro	Resultado
Medio de comunicación	UART/USB
Velocidad de transmisión	115200 baudios
Intervalo entre registros	2000 ms
Variables transmitidas por trama	16
Modos reconocidos por la HMI	Individual, serie y paralelo
Archivos generados durante la campaña	18

Nota. Elaboración propia con base en la configuración del firmware como la HMI y los registros experimentales.

La continuidad de la comunicación se evidenció en la secuencia temporal de los archivos los registros presentan intervalos de aproximadamente 2 s y conservaron las variables eléctricas, térmicas y ambientales durante las campañas. No se calculó una tasa porcentual de pérdida de tramas, pero la generación completa de los 18 archivos permitió confirmar la transferencia de datos entre el ESP32 y la computadora donde el software trabaja a 115200 baudios, procesa tramas de 16 parámetros y actualiza los datos sin bloquear la interfaz.

La conexión física entre el DAQ y la computadora se presenta en el Anexo 23. Conexión USB del módulo DAQ el reconocimiento del módulo y la visualización de datos se presentan en el Anexo 24 así también la comunicación entre el ESP32 y la HMI.

Prueba de lectura de sensores

La lectura de sensores se comprobó con el sistema integrado; se verificaron los canales de voltaje A0 y A1, los canales de corriente A2 y A3, el acondicionador del piranómetro y los

once sensores DS18B20. Las lecturas de temperatura ya incluían las ecuaciones individuales de corrección determinadas durante la calibración.

Tabla 39

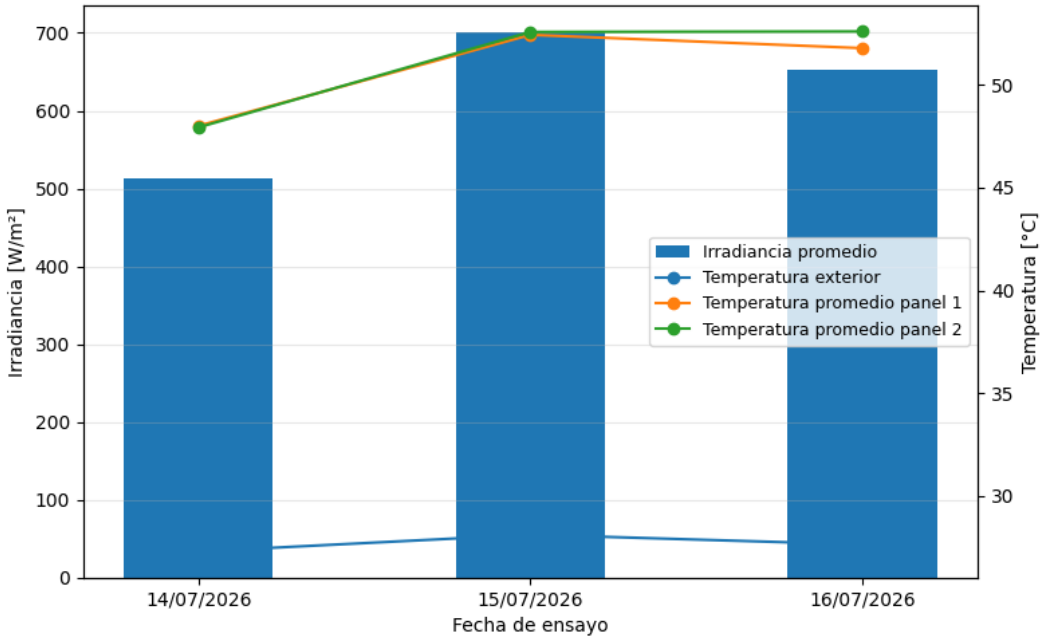
Resultados representativos de la lectura integrada de sensores

Variable o canal	Resultado registrado	Interpretación
Voltaje A0 en condición de 0 V	−0.003 V	Offset residual próximo a cero
Voltaje A1 en condición de 0 V	−0.001 V	Offset residual próximo a cero
Corriente A2 en condición de 0 A	0.058 A	Corriente residual compensada
Corriente A3 en condición de 0 A	0.045 A	Corriente residual compensada
Salida del acondicionador del piranómetro	2.705 V	Señal disponible para conversión
Temperatura exterior ambiental	18.397 °C	Sensor exterior operativo
Temperatura media del panel 1	42.572 °C	Promedio de cinco sensores
Rango térmico del panel 1	40.938 a 44.067 °C	Lectura simultánea de C1 a C5
Temperatura media del panel 2	41.684 °C	Promedio de cinco sensores
Rango térmico del panel 2	40.605 a 42.786 °C	Lectura simultánea de C1 a C5

Nota. Elaboración propia a partir de la prueba integrada del sistema DAQ. Las temperaturas corresponden a los valores corregidos mostrados por la HMI.

Figura 3.

Condiciones ambientales y térmicas promedio durante las campañas experimentales.



En la Figura 4 se observa la variación de la irradiancia y de las temperaturas registradas durante los tres días de ensayo; las temperaturas medias de los módulos se mantuvieron por encima de la temperatura exterior, comportamiento esperado debido a la absorción de radiación solar. Esta gráfica permitió comprobar la lectura simultánea de las variables ambientales y térmicas, además de mostrar que las condiciones de operación no fueron idénticas en todas las jornadas.

Los resultados permitieron comprobar que los once sensores DS18B20 fueron identificados de manera simultánea; también se verificó la respuesta de los cuatro canales analógicos y la recepción de la señal del piranómetro. Los valores residuales de los canales de corriente fueron superiores a los obtenidos en voltaje; esta condición se asocia principalmente al offset del ACS712, razón por la cual se mantuvo la compensación individual calculada durante la calibración.

La instalación física de los sensores se presenta en el Anexo 25. Distribución de los sensores en los módulos fotovoltaicos; la lectura conjunta de temperaturas, irradiancia, voltajes y corrientes se presenta en el Anexo 26. Visualización de sensores en la HMI.

Prueba en configuración individual

En la configuración individual se habilitaron los circuitos de cada módulo y se utilizaron los reóstatos para modificar progresivamente la carga; primero se registró el voltaje en circuito abierto, luego la corriente en cortocircuito y, finalmente, se efectuó el barrido necesario para construir las curvas I-V y P-V.

Durante los tres días se ejecutaron dos repeticiones diarias en siete posiciones angulares; esto produjo 42 barridos por cada módulo fotovoltaico y 958 registros válidos dentro de los bloques destinados a la adquisición de curvas.

La potencia para cada punto se calculó mediante:

$$P_i = V_i I_i$$

Mientras que el punto de máxima potencia se obtuvo de:

$$P_{max} = \max(V_i I_i)$$

Tabla 40

Resultados máximos observados en la configuración individual

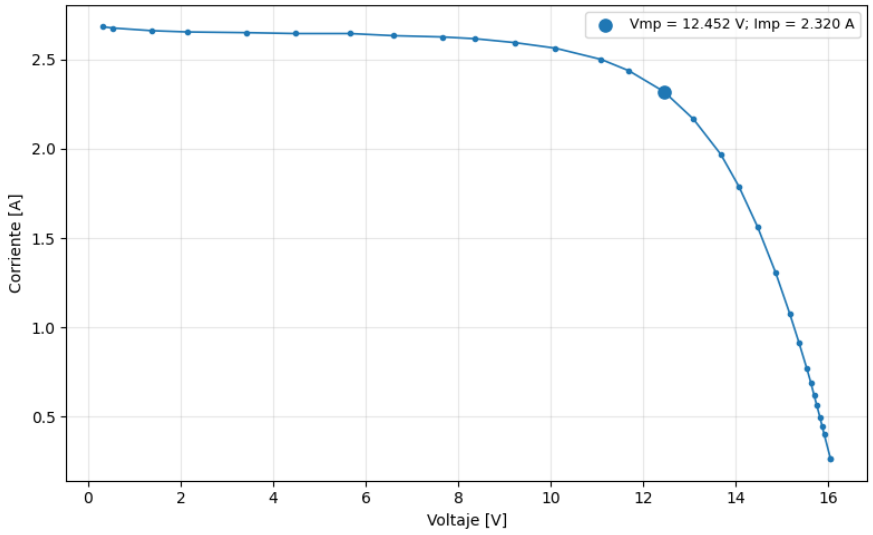
Fecha	Barridos por panel	Pmáx panel 1	Inclinación	Pmáx panel 2	Inclinación
14/07/2026	14	33.716 W	45°	33.295 W	40°
15/07/2026	14	39.884 W	15°	39.110 W	15°
5/07/2026	14	34.865 W	35°	33.752 W	40°

Nota. Elaboración propia a partir de los 42 barridos por módulo registrados en los archivos Excel. Los valores corresponden al máximo observado en cada jornada y no a valores corregidos a condiciones estándar.

La mayor potencia registrada se obtuvo el 15 de julio el panel 1 alcanzó 39.884 W y el panel 2 llegó a 39.110 W pero estos resultados no permiten establecer directamente una inclinación óptima única debido a que la irradiancia y la temperatura variaron entre los ensayos donde la comparación angular debe interpretarse junto con las condiciones ambientales de cada barrido.

Figura 4

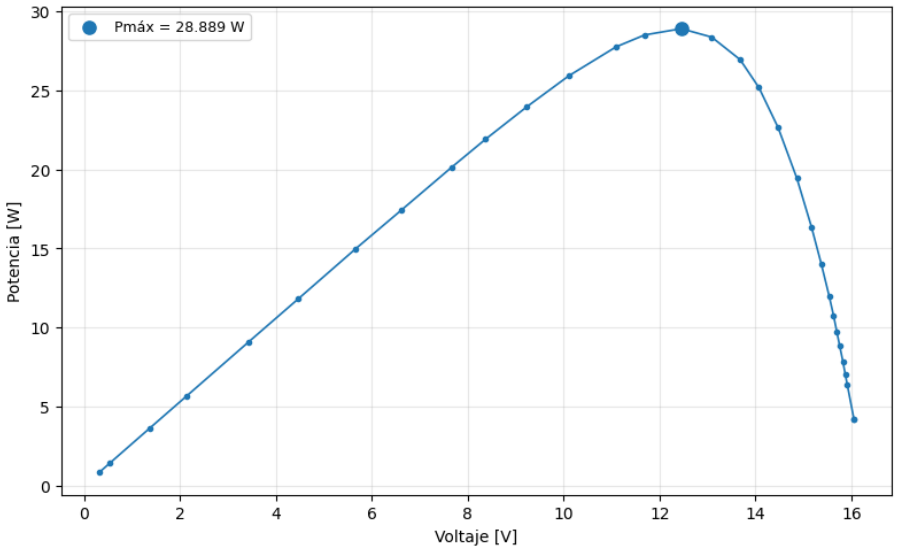
Curva I-V del panel 1 en configuración individual, 14 de julio de 2026



La Figura 5 presenta el comportamiento eléctrico característico del módulo fotovoltaico; la corriente permaneció relativamente estable durante la primera parte del barrido y disminuyó con rapidez al aproximarse al voltaje de circuito abierto. También se identifica el punto de máxima potencia, ubicado en la zona de inflexión de la curva, lo cual confirma que el banco permitió realizar correctamente el barrido de carga y registrar la relación entre voltaje y corriente.

Figura 5

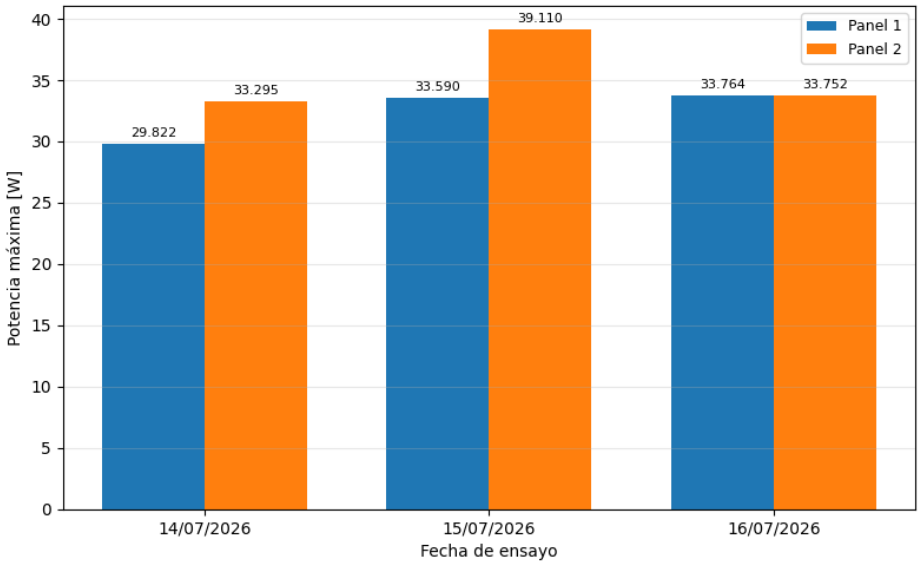
Curva P-V del panel 1 en modo independiente, 14 de julio de 2026..



En la Figura 6 se evidencia que la potencia aumentó conforme se incrementó el voltaje, alcanzó un valor máximo de aproximadamente 28.889 W y posteriormente disminuyó al acercarse a la condición de circuito abierto. La forma obtenida confirma la aplicación de la relación \(P=V\cdot I\) y permite determinar experimentalmente el punto de máxima potencia del módulo.

Figura 6

Potencia máxima registrada por fecha y módulo en configuración individual.



Como verificación adicional, una de las curvas procesadas para el 14 de julio presentó un punto de máxima potencia de 28.889 W; la forma de las curvas I-V y P-V mostró el comportamiento esperado, con una región de corriente casi constante, un punto de inflexión y una caída al aproximarse al voltaje de circuito abierto.

La Figura 7 muestra diferencias en la potencia máxima obtenida entre las tres jornadas; los valores más altos se registraron el 15 de julio, tanto para el panel 1 como para el panel 2. Aunque ambos módulos presentaron resultados próximos, se observan pequeñas variaciones asociadas a los cambios de irradiancia, temperatura y condiciones instantáneas de medición. En términos técnicos, la comparación demuestra que el banco fue capaz de detectar variaciones reales de desempeño entre días y entre módulos.

Prueba en configuración serie

Para la conexión en serie se habilitaron los interruptores correspondientes y se midieron Se refiere al voltaje en circuito abierto y a la corriente de cortocircuito de una configuración. La verificación se efectuó a partir de las siguientes relaciones:

$$V_{oc,serie} \approx V_{oc,1} + V_{oc,2}$$

$$I_{sc,serie} \approx \min(I_{sc,1}, I_{sc,2})$$

Los valores esperados se calcularon con los promedios obtenidos en los ensayos individuales de la misma jornada; luego se compararon con las mediciones del arreglo en serie.

Tabla 41

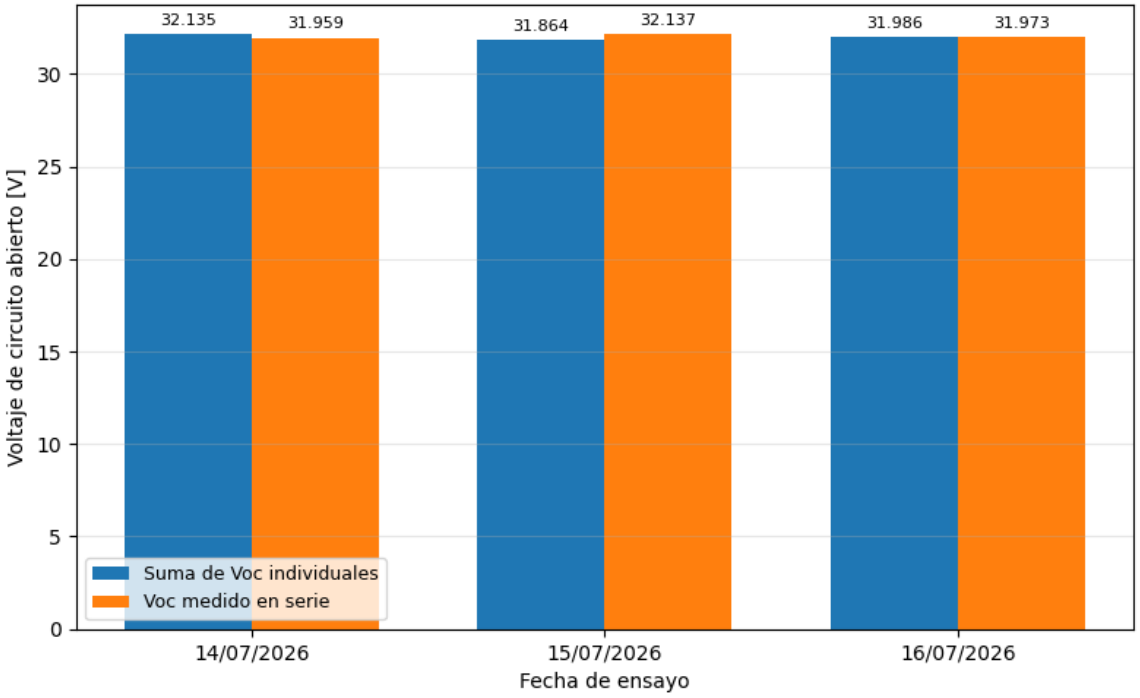
Comparación entre los valores individuales y la configuración serie

Fecha	Suma de Voc individuales	Voc serie medido	Diferencia	Isc individual limitante	Isc serie medido	Diferencia
Julio 14, 2026	32.136 V	31.959 V	0.550 %	2.832 A	2.936 A	3.706 %
Julio 15, 2026	32.038 V	32.138 V	0.310 %	3.422 A	3.335 A	2.540 %
Julio 16, 2026	32.025 V	31.973 V	0.161 %	3.119 A	3.125 A	0.184 %
Promedio	—	—	0.340 %	—	—	2.143 %

Nota. Elaboración propia. Los valores de referencia se calcularon a partir de los promedios de las dos repeticiones individuales de cada día.

Figura 7

Comparación entre la suma de Voc individuales y el Voc medido en serie.



Voltaje medido en serie presenta una diferencia promedio de 0.340 % de la suma de voltajes individuales, y en corriente, existe una diferencia promedio de 2.143 % del módulo menor Isc Indice de falla en módulos solares fotovoltaicos. La carta conseguida prueba que la conmutación puesta en práctica ha permitido sumar las tensiones, mientras que la corriente se limitó al módulo de menor capacidad instantánea. Las diferencias son debidas a la variación de irradiancia, temperatura y tiempo entre las mediciones individuales y las del arreglo.

En la Figura 8 se observa una alta correspondencia entre la suma de los voltajes de circuito abierto medidos individualmente y el voltaje obtenido con los módulos conectados en serie. La diferencia promedio fue cercana al 0.340 %; por tanto, los resultados confirman que la configuración serie fue realizada correctamente y que el sistema de adquisición registró el incremento esperado de tensión. Las pequeñas diferencias pueden atribuirse a la variación de las condiciones ambientales entre mediciones consecutivas.

Prueba en configuración paralelo

En la configuración paralelo se verificó que ambos módulos trabajaran con una tensión común y que la corriente total correspondiera aproximadamente a la suma de las corrientes individuales. Las relaciones consideradas fueron:

$$V_{oc,paralelo} \approx \frac{V_{oc,1} + V_{oc,2}}{2}$$

$$I_{sc,paralelo} \approx I_{sc,1} + I_{sc,2}$$

Tabla 42

Comparación entre los valores individuales y la configuración paralelo

Fecha	Voc individual medio	Voc paralelo medido	Diferencia	Suma de Isc individuales	Isc paralelo medido	Diferencia
14/07/2026	16.068 V	16.067 V	0.008 %	5.720 A	5.637 A	1. 463 %
15/07/2026	16.019 V	15.531 V	3.045 %	6.880 A	6.853 A	0.91 %
16/07/2026	16.013 V	15.970 V	0.264 %	6.330 A	6.169 A	2.529 %
Promedio	—	—	1.106 %	—	—	1.461 %

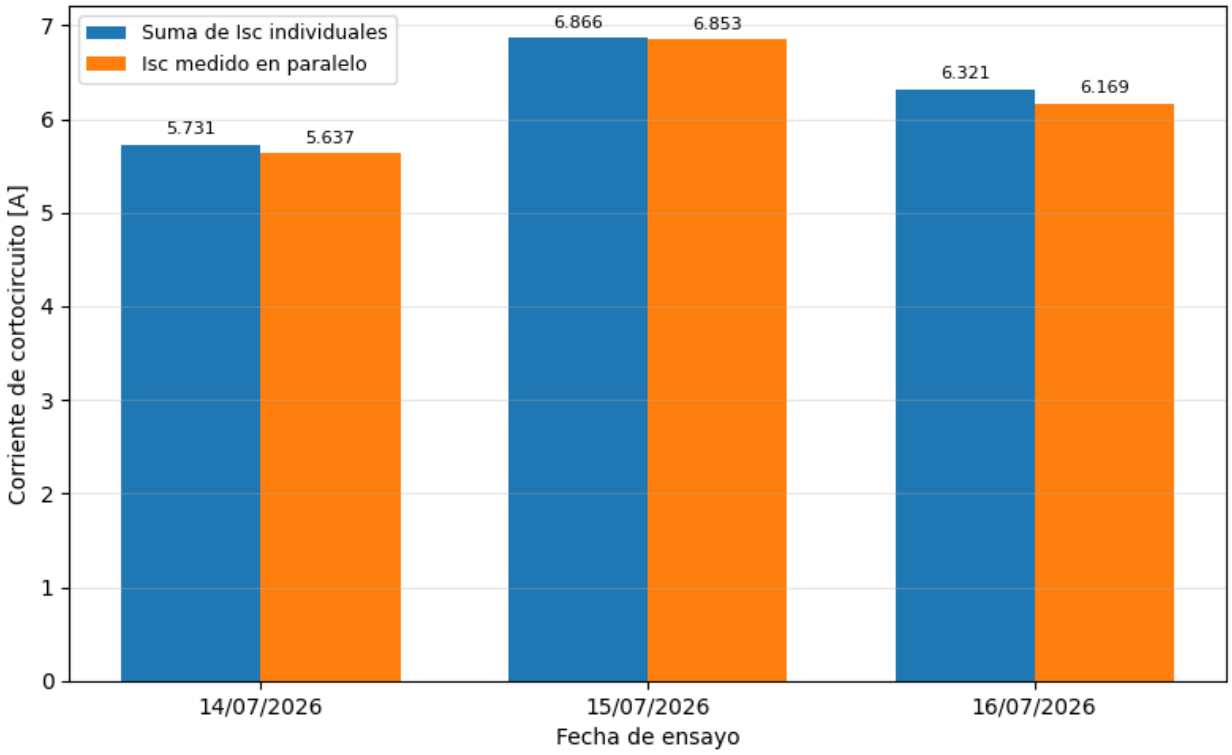
Nota. Elaboración propia. La tensión de referencia corresponde al promedio de Voc de los módulos; la corriente de referencia corresponde a la suma de Isc.

La tensión del arreglo mantuvo una diferencia promedio de 1.106 % respecto del voltaje individual medio la corriente presentó una diferencia promedio de 1.461 % respecto de la suma de las corrientes individuales donde este comportamiento confirma la conexión en paralelo como la tensión permaneció en el nivel propio de un módulo y la capacidad de corriente se

incrementó dónde la mayor diferencia de tensión se obtuvo el 15 de julio debido a que las mediciones no se ejecutaron de forma simultánea donde la variación ambiental entre pruebas influyó en la comparación.

Figura 8

Comparación entre la suma de Isc individuales y la Isc medida en paralelo.



La Figura 9 evidencia que la corriente de cortocircuito obtenida en paralelo se aproximó a la suma de las corrientes individuales de ambos módulos; la diferencia promedio fue de aproximadamente 1,461 %. Este resultado confirma el funcionamiento de la configuración paralelo, en la cual la tensión se mantiene en un nivel similar al de un módulo, mientras la capacidad de corriente aumenta. Las desviaciones observadas se consideran coherentes con los cambios de irradiancia, temperatura y el intervalo existente entre cada medición.

Prueba de almacenamiento de datos

La función de almacenamiento se verificó durante cada campaña; al finalizar los ensayos, la HMI generó archivos en formato Excel con la hora, las variables eléctricas, la irradiancia y las temperaturas. En el modo individual se almacenaron 17 columnas: una columna temporal y 16 variables de medición; en las configuraciones serie y paralelo se registraron 15 columnas, debido a que el voltaje y la corriente correspondieron al arreglo completo.

Tabla 43

Archivos generados durante las pruebas funcionales

Configuración	Archivos generados	Estructura del registro	Datos experimentales principales
Individual	6	17 columnas	Voc, Isc, curvas I-V/P-V, irradiancia y temperaturas
Serie	6	15 columnas	Voc serie, Isc serie, irradiancia y temperaturas
Paralelo	6	15 columnas	Voc paralelo, Isc paralelo, irradiancia y temperaturas
Total	18	—	Tres días y dos repeticiones diarias

*Nota***.** Elaboración propia a partir de los archivos exportados por la HMI.

La revisión de los archivos confirmó la presencia de encabezados, marcas de tiempo y datos numéricos en cada bloque de ensayo. En la configuración individual se identificaron 958 registros válidos destinados a la elaboración de curvas; además, se conservaron las mediciones independientes de Voc e Isc. La generación de archivos para las tres

configuraciones permitió procesar posteriormente los datos en Google Colab, sin modificar los registros originales obtenidos por el banco.

Obtención experimental de hoja de datos para paneles fotovoltaicos

La ejecución experimental de las hojas de especificaciones técnicas fue realizada para caracterizar la firma electrotérmica de los módulos fotovoltaicos en operación en condiciones de prueba fotovoltaica (PTC) reales en exterior, para poder de esta forma recoger la respuesta de los portadores de carga y la deriva térmica del silicio, en función de la irradiancia y la temperatura ambiental de campo; así como para vencer las limitaciones de la teoría de los entornos ideales del laboratorio (STC). El protocolo metrológico aplicado se basó en la norma IEC 60904-1 para la toma de características corriente-voltaje (I-V), adaptada mediante la norma IEC 60904-9 para operaciones outdoor.

Condiciones experimentales de ensayo y protocolo de adquisición

La caracterización fotovoltaica se procedió en un entorno de modelo outdoor bajo condiciones de prueba (PTC) durante 2 días consecutivos en el horario fijo de 12:00 PM. Las condiciones ambientales requirieron un cielo completamente despejado, un ángulo fijo de 15° para todas las mediciones.

El panel requirió un reposo absoluto de 15 minutos para vencer la inercia térmica de las capas constructivas del panel solar fotovoltaico y que la temperatura de la unión p-n de las celdas de silicio iguale la temperatura de los sensores internos del panel.

Procedimiento de barrido paramétrico

Se siguió de forma rigurosa el método de barrido y control de carga para evitar la distorsión de variables por efecto Joule:

- **Fase A:** En t=0, en vacío total, se registró el voltaje de circuito abierto (Voc) y sus parámetros consiguientes de cada panel (irradiación, temperatura de panel, temperatura exterior), asegurando que la caída de tención en cada panel por resistencia interna sea nula.

- **Fase B:** Se conectó el reóstato correspondiente a cada panel y se realizó el barrido manualmente de los mismos de forma sincronizada, a una velocidad lo suficiente mente baja para obtener una buena estimación de las gráficas I-V y P-V, así mismo la obtención del punto de máxima potencia (MPP) de cada panel. El sistema DAQ ya integra una frecuencia de muestreo de 2 segundos para permitir la estabilización inductiva de las espiras y evitar el ruido de solapamiento (aliasing) inducido por la fricción mecánica del reóstato. Se muestra resultado de curvas I-V y P-V en el anexo 16.
- **Fase C:** Inmediatamente después de finalizar el barrido del reóstato, se retiraron los mismo y se cortocircuitó cada panel, permitiendo el registro de la corriente de corto circuito (Isc) de cada panel.

Este mismo método de medición se aplicó por 5 iteraciones en cada panel por día, se incluyó intervalos de reposo de 1 minuto entre medición a causa de la subida de temperatura al cortocircuitar momentáneamente los paneles.

Procesamiento computacional de datos

Las variables comunes temperatura exterior, temperatura de cada panel e irradiación, se promediaron de forma tal que se estabilizara el modelo termodinámico de las mediciones obtenidas.

El barrido de los reóstatos, al realizarse de forma manual, registró una cantidad de puntos diferentes en cada caracterización elaborada, por lo que se realizó un procesamiento de datos mediante el algoritmo de interpolación Polinomial Hermiteana Cúbica por Tramos (PCHIP). Este modelo permite eliminar oscilaciones matemáticas espurias del fenómeno de Runge y preserva la monotonicidad física exigida por la ecuación del diodo Shockley (dI/dV<0).

$$I_k(V) = c_1 + c_2(V - V_k) + c_3(V - V_k)^2 + c_4(V - V_k)^3$$

Considerando que en el barrido de los reóstatos para la obtención de las curvas I-V y P-V no permiten llegar hasta Voc e Isc, los valores correspondientes de cada medición se

inyectaron en la elaboración de las curvas por el método PCHIP, forzando así las condiciones de frontera.

De las ecuaciones obtenidas, se definió un vector común de 1000 puntos discretos comunes de todas las curvas, los puntos obtenidos de las 10 curvas, se promediaron y se generó una curva final mediante el mismo modelo PCHIP.

Hojas de especificaciones experimentales (Datasheets)

El área de incidencia de los paneles solares medido, fue de 0.335068 m2, de aquí, las ecuaciones principales para la obtención de la Eficiencia (η) y el Factor de Forma (FF) se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \left(\frac{P_{max}}{\overline{G}_{promedio} \cdot A_{area}} \right) \times 100$$

$$FF = \left(\frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{\overline{V}_{oc} \cdot \overline{I}_{sc}} \right) \times 100$$

Donde P_{max} es la potencia máxima obtenida de la ecuación calculada; $\overline{G}_{promedio}$ corresponde a la irradiación promedio de las mediciones realizadas; a_{area} representa el área de incidencia de la luz solar sobre cada panel; V_{mp} es el voltaje en el punto de máxima potencia; I_{mp} es la corriente en el punto de máxima potencia; $\overline{V}_{oc}$ es el voltaje promedio de circuito abierto; y $\overline{I}_{sc}$ es la corriente promedio de cortocircuito.

Los resultados obtenidos se muestran en los anexos 17 y 18 del panel 1 y anexos 19 y 20 del panel 2.

Análisis técnico de la hoja de especificaciones experimentales (Datasheet)

La corriente de cortocircuito (Isc) en el panel 1 y 2 resultó respectivamente en 3.48 A y 3.44 A. Estos resultados identifican un flujo reducido de fotones al tener una radiación incidente de 774.20 W/m2, lo que evidencia un déficit del 22.58% en comparación a la norma STC de 1000 W/m2. El entorno indujo un estrés térmico, elevando la temperatura de celda (Tcelda) a Panel 1 a 57.27 °C y Panel 2 a 55.67 °C. Este incremento térmico superior a los 30 °C respecto

a la referencia estándar causó una degradación del voltaje por aumento de la corriente de recombinación interna, lo que comprimió el factor de forma (FF) a un rango de 63.38% para el Panel 1 y 63.60% para el Panel 2.

Sostener un FF superior al 60% bajo alta agitación térmica demuestra que los paneles poseen una integridad estructural óptima (sin microfracturas severas ni degradación PID), se certifica un excelente estado de salud (SOH) de la tecnología testeada. La extracción paramétrica de las coordenadas de máxima transferencia definió una Potencia Máxima (Pmax) experimental de 34.90 W para el Panel 1 y de 34.63 W para el Panel 2. La variación absoluta de apenas 0.27 W entre ambos módulos ratifica la homogeneidad en los materiales de fabricación, manteniéndose firmemente dentro del rango de tolerancia técnica del 3%.

Para evaluar el rendimiento continuo que la Pmax medida representa fielmente a módulos nominales de mayor capacidad frente a la penalización de calor (pérdida del 12.9%), se emplean las siguientes fórmulas analíticas de deriva térmica.

$$P_{STC-estimada} = P_{max} \cdot [1 + \gamma \cdot (T_{celda} - 25)]$$

$$I_{sc-STC} = I_{sc-PTC} \cdot \left(\frac{1000}{G_{PTC}}\right)$$

Aplicando un coeficiente térmico de potencia típico para silicio monocristalino de -0.004/°C en la proyección numérica, la capacidad estándar extrapolada a STC (25 °C) asciende a 40.07 W para el Panel 1 y 39.47 W para el Panel 2. De igual forma, al compensar matemáticamente el déficit de irradiancia hacia los 1000 W/m2, las corrientes de cortocircuito STC ascienden paramétricamente a 4.49 A y 4.44 A, demostrando que los componentes fotovoltaicos se encuentran operando con alta eficiencia dentro de sus límites físicos.

Análisis general de resultados

La integración de los subsistemas mecánico, eléctrico, electrónico y computacional permitió obtener un banco de ensayos funcional para la caracterización de dos módulos fotovoltaicos en condiciones exteriores. La validación no se limitó a comprobar el encendido del prototipo; incluyó el análisis estructural, la calibración de los canales de medición, la comunicación entre el ESP32 y la HMI, la generación de curvas I–V y P–V, la evaluación de las configuraciones individual, serie y paralelo, así como el almacenamiento de los registros experimentales.

En el sistema mecánico se analizaron por separado el soporte con ajuste angular y la estructura principal. Para el soporte móvil, la tensión máxima equivalente de Von Mises fue de 74.517 MPa, valor inferior al límite de elasticidad de 207 MPa establecido para el acero galvanizado; el desplazamiento máximo alcanzó 0.273 mm y el factor de seguridad mínimo fue de 2.778. Estos resultados indican que el mecanismo mantiene un comportamiento elástico y una deformación reducida bajo el peso propio y las dos cargas externas de 25 N consideradas en la simulación.

La estructura principal presentó una tensión máxima de Von Mises de 91.385 MPa, un desplazamiento máximo de 2.218 mm y un factor de seguridad mínimo de 2.265. La tensión calculada representa aproximadamente el 44.15 % del límite elástico del material; por consiguiente, se conserva una reserva resistente suficiente frente a las cargas aplicadas. Los resultados de ambos modelos confirman que la estructura puede soportar los dos paneles, los elementos de instrumentación y el tablero eléctrico sin superar el régimen elástico previsto en el diseño. Esta conclusión se limita a las condiciones estáticas simuladas; no incluye cargas extraordinarias de viento, impacto o transporte.

El mecanismo manual permitió posicionar los paneles entre 15° y 45°, con incrementos de 5°. Las pruebas efectuadas en las siete posiciones demostraron que el ajuste angular puede ejecutarse sin desmontar los módulos y que la estructura conserva su estabilidad durante la

medición. No obstante, la potencia máxima no se presentó siempre en el mismo ángulo: el 14 de julio los máximos se registraron a 45° para el panel 1 y a 40° para el panel 2; el 15 de julio ambos módulos alcanzaron su mayor potencia a 15°, mientras que el 16 de julio los máximos se obtuvieron a 35° y 40°. Esta variación demuestra que no es técnicamente correcto establecer un ángulo óptimo únicamente a partir de la potencia medida, debido a que la irradiancia y la temperatura no permanecieron constantes entre los barridos.

En el sistema eléctrico se verificaron 112 VAC en la entrada, 12.250 VDC en la fuente principal, 5.140 VDC y 3.330 VDC en las salidas reguladas. La mayor desviación respecto del valor nominal fue de 2.800 % en la línea de 5 V; aun así, los niveles obtenidos permitieron alimentar de forma estable al ESP32, el ADS1115, los sensores y los circuitos auxiliares. La prueba comprobó la distribución normal de energía y la disponibilidad de las protecciones instaladas no comprendió ensayos destructivos ni la determinación de sus curvas de disparo.

La calibración de los once sensores DS18B20 redujo los errores sistemáticos individuales mediante ecuaciones lineales. Diez sensores presentaron errores máximos posteriores inferiores a 0.175 °C el sensor Panel 1 C3 alcanzó un error residual máximo de 0.813 °C siendo el canal con mayor desviación. En todos los casos se obtuvieron coeficientes de determinación próximos a 0.999 donde la corrección individual resultó adecuada porque evitó aplicar un único desplazamiento a sensores que presentaban pendientes e interceptos diferentes.

Los canales de voltaje A0 y A1 se corrigieron con pendientes de 1.013 y 1.003 respectivamente junto con interceptos cercanos a −0.015 V. Los canales de corriente A2 y A3 presentaron pendientes de 1.004 y 0.993 ya que sus interceptos fueron aproximadamente −0.226 A y −0.213 A. Estos offsets confirman la necesidad de calibrar individualmente los ACS712 especialmente en la zona próxima a cero. Durante la prueba integrada se observaron valores residuales de 0.058 A y 0.045 A en ausencia de corriente por ello las mediciones de

baja magnitud deben interpretarse considerando la incertidumbre asociada al offset y al ruido del sensor.

La calibración del piranómetro NovaLynx CMP3 se efectuó mediante comparación con el instrumento Apogee MP-200. De los 1675 pares sincronizados se utilizaron 1081 observaciones el ajuste alcanzó un coeficiente de determinación de 0.926 y redujo el RMSE de 96.75 a 63.55 W/m² equivalente a una disminución aproximada del 34.31 %. La corrección mejoró la concordancia con el instrumento de referencia, aunque el error residual es mayor que el observado en las mediciones de temperatura y variables eléctricas. En consecuencia, la irradiancia corregida es adecuada para el análisis experimental del banco pero no debe presentarse como una medición de referencia metrológica de alta exactitud.

El sistema de adquisición transmitió 16 variables mediante comunicación UART/USB a 115200 baudios, con un intervalo de registro de 2 s. La lectura simultánea comprendió dos voltajes, dos corrientes, irradiancia, temperatura exterior y diez temperaturas superficiales. La generación de 18 archivos Excel correspondientes a tres días, tres configuraciones y dos repeticiones diarias evidenció la continuidad de la comunicación y del almacenamiento. En la configuración individual se conservaron 958 registros válidos para el procesamiento de las curvas pero como no se calculó directamente una tasa de pérdida de tramas la confiabilidad de la comunicación debe expresarse en función de la continuidad observada y de la integridad de los archivos obtenidos.

Las curvas I–V mostraron una región inicial de corriente aproximadamente constante seguida por la zona de inflexión y la disminución de corriente al aproximarse al voltaje de circuito abierto. Las curvas P–V presentaron un máximo definido, lo que permitió obtener experimentalmente Vmp, Imp y Pmax. En las pruebas funcionales los valores máximos diarios del panel 1 fueron 33.716 W, 39.884 W y 34.865 W; para el panel 2 se obtuvieron 33.295 W, 39.110 W y 33.752 W. Los mayores valores se registraron el 15 de julio la proximidad entre

ambos módulos evidencia un comportamiento eléctrico semejante mientras que la variación entre jornadas refleja la influencia de las condiciones ambientales.

La hoja experimental construida bajo condiciones exteriores presentó corrientes de cortocircuito de 3.48 A y 3.44 A para los paneles 1 y 2 respectivamente la irradiancia promedio fue de 774.20 W/m² y las temperaturas de celda alcanzaron 57.27 °C y 55.67 °C. Bajo estas condiciones se obtuvieron factores de forma de 63.38 % y 63.60 %, así como potencias máximas de 34.90 W y 34.63 W. La diferencia absoluta de potencia entre los módulos fue de 0.27 W lo cual indica una respuesta homogénea durante el protocolo aplicado por ende estos resultados corresponden a condiciones reales de operación y no deben compararse directamente con la potencia nominal de 43 W sin efectuar la corrección por irradiancia y temperatura.

La conexión serie presentó una diferencia promedio de 0.340 % entre el voltaje medido y la suma de los voltajes individuales. La corriente registró una diferencia promedio de 2.143 % respecto del módulo limitante. En paralelo la diferencia promedio del voltaje fue de 1.106 % respecto del voltaje individual medio para la corriente se obtuvo una diferencia de 1.461 % frente a la suma de las corrientes individuales. Estos resultados confirman la operación de la lógica cableada como la configuración serie incrementó la tensión y conservó la corriente limitada por el módulo de menor respuesta mientras la configuración paralela mantuvo un nivel de tensión semejante al individual e incrementó la corriente disponible.

En conjunto las pruebas demuestran que el banco permite ejecutar actividades de caracterización fotovoltaica con adquisición sincronizada de variables eléctricas, térmicas y ambientales. La correspondencia entre el comportamiento teórico de las conexiones y las mediciones experimentales junto con la generación de curvas y archivos estructurados confirma el cumplimiento funcional del objetivo general donde las principales limitaciones identificadas corresponden a la variación ambiental entre mediciones sucesivas, el

accionamiento manual del reóstato, el error residual del piranómetro y la ausencia de un cálculo formal de incertidumbre para la cadena completa de medición.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se diseñó y construyó un banco de ensayos capaz de integrar dos paneles fotovoltaicos, ajuste angular, instrumentación multivariable, adquisición electrónica, procesamiento mediante HMI y almacenamiento automático; de esta manera, se cumplió el objetivo general de disponer de una plataforma para mediciones fotovoltaicas en el Laboratorio de Conversión de la Energía y Energías Sustentables.
- El objetivo específico relacionado con la estructura de soporte se cumplió mediante la fabricación de un sistema metálico para dos módulos con inclinación regulable entre 15° y 45° en pasos de 5°. La evaluación experimental de las siete posiciones confirmó que el ajuste puede efectuarse manteniendo la estabilidad del conjunto.
- El soporte angular presentó una tensión máxima de Von Mises de 74.517 MPa con un desplazamiento máximo de 0.273 mm, obteniendo un factor de seguridad de 2.778 como en la estructura principal, la misma alcanzó 91.385 MPa 2.218 mm y un factor de seguridad de 2.265. En ambos casos, las tensiones permanecieron por debajo del límite elástico de 207 MPa por lo que el diseño satisface los criterios estáticos de resistencia y rigidez considerados.
- La instrumentación implementada permitió medir dos señales de voltaje, dos de corriente, irradiancia solar, temperatura exterior y diez temperaturas superficiales; por tanto, se cumplió el segundo objetivo específico al integrar los elementos necesarios para registrar simultáneamente las variables eléctricas}, térmicas y ambientales del ensayo.

- La calibración individual de los DS18B20 redujo el error máximo a valores inferiores a 0.175 °C en diez de los once sensores; el canal Panel 1 C3 presentó un error residual de 0.813 °C. Los coeficientes de determinación próximos a 0.999 confirman la linealidad de las correcciones dentro del intervalo evaluado.
- La comparación del piranómetro NovaLynx CMP3 con el Apogee MP-200 produjo un (R^2) de 0.926 y redujo el RMSE de 96.75 a 63.55 W/m² equivalente a una mejora del 34.31 %. La corrección aumentó la concordancia del canal de irradiancia, pero en las interpretaciones de potencia y eficiencia hay que considerar su incertidumbre residual.
- El sistema de adquisición basado en ESP32 y ADS1115 transmitió 16 variables a 115200 baudios, con un intervalo de 2 s. La obtención de 18 archivos Excel y 958 registros válidos para curvas individuales demuestra el cumplimiento del tercer objetivo específico, relacionado con la adquisición y conservación de los parámetros del banco.
- La HMI permitió seleccionar los modos individuales, serie y paralelo visualizar las variables, generar curvas I–V y P–V y almacenar los resultados. Estas funciones verifican el cumplimiento del cuarto objetivo específico correspondiente al diseño e implementación del sistema informático de procesamiento.
- En la configuración serie el voltaje presentó una diferencia promedio de 0.40 % respecto de la suma de los valores individuales en paralelo la corriente difirió 1.461 % de la suma de las corrientes individuales. La proximidad entre los valores teóricos y experimentales confirma el funcionamiento de la conmutación eléctrica implementada.
- Durante la caracterización exterior se obtuvieron potencias máximas de 34.90 W y 34.63 W, con una diferencia de 0.27 W entre los módulos. Los resultados evidencian una respuesta homogénea bajo las condiciones evaluadas pero la potencia medida estuvo condicionada por una irradiancia promedio de 774.20 W/m² y temperaturas de celda superiores a 55 °C por lo que no representa directamente la potencia nominal en condiciones STC.

Recomendaciones

- Incorporar un sistema automático de barrido electrónico de carga; esto permitiría obtener las curvas I–V en menor tiempo, reducir la influencia de las variaciones de irradiancia y eliminar la dependencia de la velocidad manual de accionamiento del reóstato.
- Realizar futuras campañas con un piranómetro de referencia calibrado y trazable; además, conviene aumentar el número de puntos de comparación y evaluar por separado diferentes intervalos de irradiancia, con el fin de reducir el error residual observado en el canal NovaLynx.
- Efectuar en el firmware una compensación dinámica del cero de los ACS712 antes de cada ensayo también se recomienda promediar varias muestras en ausencia de carga debido a los residuos de 0.058 A y 0.045 A observados en los canales de corriente.
- Perfeccionar la validación estructural con un análisis de cargas de viento, vibración y transporte en especial si el banco será utilizado de forma permanente en exteriores la simulación actual demuestra cumplimiento bajo cargas estáticas pero no cubre condiciones ambientales extraordinarias.
- Desarrollar un presupuesto formal de incertidumbre para voltaje. Señales de tensión, corriente, temperatura, irradiancia y potencia; este análisis debe incluir resolución del ADC, errores residuales de calibración, repetibilidad, sincronización y propagación de incertidumbres, permitiendo expresar los resultados fotovoltaicos con intervalos de confianza.

Referencias

ASM International, A. (1993). *ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* Materials Park, Ohio: ASM International.

Carrillo, C., Torres, M., & Paredes, D. (2020). Evaluación del desempeño de módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino en los Andes ecuatorianos. *Revista Técnica Energía*, 45-56.

Censolar, C. (. (2018). *Energía Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones.* Barcelona: Marcombo.

Clevis Lozano-Rivera, M. O.-R. (2020). *Implementación en FPGA de un módulo lineal de estimación de parámetros eléctricos para un sistema fotovoltaico (PVS).* Recuperado el 2026, de AMELICA / Tecnología en marcha: https://portal.amelica.org/ameli/journal/263/2631042012/#

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Gómez, J., & Ruiz, F. (2015). *Sistemas de Adquisición de Datos con Microcontroladores: Aplicaciones con Arduino y Raspberry Pi.* Madrid: Ra-Ma.

Holguìn Mantuano, & Marcillo Parrales. (2025). *Implementaciòn de un banco de panel solar como energìa alternativa para el desarrollo de pràcticas en el laboratorio de electrònica y robòtica.* Manabì: Universidad Estatal del sur de Manabì .

IEC, I. E. (2011). *IEC 61853-1:2011. Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating – Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating.* Geneva, Switzerland: IEC.

INER, I. N. (2021). *Guía para la Medición de Curvas Características I-V en Módulos Fotovoltaicos en Condiciones Reales de Operación.* Quito: INER.

King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model.* Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.

Pérez, A. (12 de 2022). Diseño e implementación de un seguidor solar de dos ejes con controlador Arduino. *Proyecto de Titulación - Carrera de Ingeniería Mecatrónica*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Rodríguez, S. (2018). *Instrumentación Virtual con LabVIEW y Python: Adquisición, Procesamiento y Control.* Buenos Aires: Alfaomega.

Salazar, R. y. (2022). Diseño de un sistema manual de posicionamiento angular para módulos fotovoltaicos en laboratorios de energía solar. *Ingeniería Mecánica y Energética*, 45-58.

Torres, M. &. (2021). *Caracterización comparativa de paneles fotovoltaicos en configuraciones serie, paralelo y aislada: un enfoque pedagógico.* Ciudad de México: Editorial Universitaria de la UNAM.