

Polígono de evaluación de sistemas fotovoltaicos

Polygone of evaluation of photovoltaic systems

Kevin Rivero Crespo^{I,*}, René Díaz Suárez^I, Josué Benavides Esteva^I, Raciél Márquez Saurí^{II}, Omar Borrego Deulofeu^{II}, Lídice Vaillant Roca^I

^IUniversidad de La Habana. La Habana, Cuba

^{II}División de Aseguramiento Técnico de la Empresa de Servicios de Telecomunicaciones a los Órganos de la Defensa (DAT.SERTOD). La Habana, Cuba

*Autor de correspondencia: kevin.rivero@imre.uh.cu

Recibido: 8 de octubre de 2025

Aprobado: 26 de noviembre de 2025

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

La creciente demanda energética y la necesidad de mitigar el cambio climático exigen la evaluación rigurosa de sistemas fotovoltaicos en condiciones locales. Este trabajo presenta el diseño, implementación y resultados preliminares de un polígono de evaluación en la Universidad de La Habana, Cuba. En esta infraestructura se integraron seis sets experimentales, dos sets de medición y cinco ensayos normalizados para caracterizar componentes bajo el clima tropical cubano. Los resultados preliminares demostraron la efectividad del polígono para diagnosticar fallas en diferentes contextos, desde pérdidas de potencia (hasta 90%) por corrosión hasta defectos de fabricación y daños por transporte en módulos recién adquiridos. Este desempeño permitió concluir que el polígono no solo es una plataforma de investigación, sino también una herramienta de política tecnológica que contribuye a la transición energética sostenible en Cuba, proporcionando datos confiables para la toma de decisiones y la mejora normativa.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos; polígono de evaluación; sets experimentales; sets de medición; ensayos normalizados.

The growing energy demand and the need to mitigate climate change require the rigorous evaluation of photovoltaic systems under local conditions. This paper presents the design, implementation, and preliminary results of an evaluation polygone at the University of Havana, Cuba. This infrastructure integrates six experimental sets, two measurement sets, and five standardized tests to characterize components under the Cuban tropical climate. The preliminary results demonstrated the site's effectiveness in diagnosing failures in different contexts, ranging from power losses (up to 90%) due to corrosion to manufacturing defects and transportation damage in newly acquired modules. This performance led to the conclusion that the site is not only a research platform but also a technological policy tool that contributes to the sustainable energy transition in Cuba, providing reliable data for decision-making and regulatory improvement.

Keywords: Photovoltaic systems; evaluation polygone; experimental sets; measurement sets; standardized tests.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global de energía, unida a la urgencia de mitigar el cambio climático, ha impulsado una transición acelerada hacia fuentes de energía limpias y renovables [1]. Entre estas, la solar fotovoltaica destaca por su capacidad para generar electricidad a partir de una fuente inagotable y no contaminante; sin embargo, su despliegue a gran escala enfrenta desafíos técnicos y económicos [2], como la variabilidad geográfica en radiación solar, temperatura y humedad, que afectan la eficiencia y durabilidad de los sistemas fotovoltaicos. Para superar estos obstáculos, resulta esencial adaptar las tecnologías a las condiciones locales y optimizar su diseño mediante investigación y desarrollo rigurosos.

En este contexto, los polígonos fotovoltaicos han emergido como infraestructuras estratégicas. Estos laboratorios permiten evaluar y validar componentes y sistemas FV en entornos reales de operación, sometiéndolos a diversas condiciones climáticas con vistas a obtener información sobre su eficiencia, fiabilidad y durabilidad. Además, facilitan la recopilación de datos precisos y confiables, esenciales para la innovación y el avance tecnológico. Su papel trasciende lo técnico, porque fomentan la colaboración entre investigadores, empresas y entidades gubernamentales, desde un intercambio multidisciplinario que amplifica el impacto de los resultados.

A nivel internacional, iniciativas como el Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica (PVPS) de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), creado en 1993, han sido fundamentales para impulsar la investigación y el desarrollo en este campo. La tarea 15 del PVPS, por ejemplo, ha analizado el estado actual y futuro de los sistemas fotovoltaicos, incluyendo el papel de los polígonos. Entidades líderes como el Instituto Austriaco de Tecnología (AIT) [3], el CIEMAT [4] y TECNALIA [5], en España, Canmet ENERGY en Canadá [6], el Parque de Energía Verde de IRESEN en Marruecos [7] y el SERIS en Singapur [8], han contribuido significativamente al avance de estas tecnologías, demostrando su viabilidad y promoviendo políticas energéticas sostenibles [9].

En Cuba, la necesidad de infraestructuras dedicadas a la evaluación de tecnologías solares, sumada al importante rol de la FV en la transición energética del país [10], ha motivado la creación por parte del Laboratorio de Fotovoltaica, de un polígono fotovoltaico en la Facultad de Física de la Universidad de La Habana. Este proyecto aprovecha la experiencia y los recursos multidisciplinarios de la institución, así como su ubicación estratégica, con orientación lateral al sur y un horizonte despejado, que maximiza la captación de radiación solar. El polígono servirá como un laboratorio a cielo abierto para la inspección, medición y prueba rigurosa de componentes FV, y contribuirá al desarrollo de soluciones adaptadas a las condiciones locales. Este trabajo describe la localización, configuración y resultados preliminares del polígono, destacando su potencial como herramienta para la investigación, innovación y formación en el campo de la energía solar FV.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelado del polígono fotovoltaico

Para la conceptualización y diseño tridimensional del polígono y sus componentes, se empleó el *software* de diseño asistido *Autodesk Inventor Professional* [11], que permitió modelar de manera precisa el área de ubicación y visualizar la disposición espacial de los elementos del sistema.

Equipos de monitoreo y adquisición de datos

Para el monitoreo solar y climático, se seleccionó la estación de radiación STR-21G-S1 debido a su capacidad para medir con alta precisión componentes clave de radiación (DNI, GHI y DHI). Esta cuenta con sensores de clase A (piranómetro MS-80S y pirheliómetro MS-57), certificados bajo la norma ISO 9060:2018, y será montada sobre un seguidor de dos ejes (STR-21G), para asegurar mediciones confiables incluso en condiciones variables. Complementariamente, se eligió la estación meteorológica PVMet-500-M1 para la adquisición de datos ambientales críticos, como temperatura, humedad y velocidad del viento. La combinación de ambas garantizará un monitoreo integral del polígono fotovoltaico proporcionando exactitud y confiabilidad para entornos diversos de medición. Todos los registros se almacenarán mediante el *datalogger* CR1000X, reconocido por su robustez y precisión en aplicaciones remotas.

Sistema de seguimiento solar

Se implementará un sistema de seguimiento de doble eje ST44M2V2P, con capacidad para dos paneles solares, el cual garantizará su óptima orientación hacia la radiación solar.

Componentes del sistema fotovoltaico

El sistema FV estará compuesto por los siguientes elementos:

- Módulos FV: Módulos monocristalinos de silicio con una potencia nominal de 400 W y 108 celdas.
- Microinversores: Microinversor DS3 de *APSystem* – 880W para autoconsumo, y el IQ8P con 480W de salida y 670W en la entrada, los cuales permiten una optimización a nivel de módulo y una mayor eficiencia del sistema.
- Inversor de conexión a red: *Red Solax XI Mini* 1100 W, para comparar con los microinversores.
- Inversor de conexión a red: *SMA SunnyBoy* 6,0 para conexión a red sin transformador, con una potencia nominal de 6 kW.
- Baterías: Baterías estacionarias de plomo-ácido abierta de la gama *Classic 203A/100h OPzS,block* 12V, diseñadas para proporcionar almacenamiento de energía y respaldo.
- Inversor de batería bidireccional: *SMA Sunny Island* 8,0H 8kW 48V, permite la conexión a la red eléctrica y la operación fuera de red.

Fabricación de partes y piezas de ensayos

La fabricación de las mesas de ensayo para las pruebas de inspección visual, calibración de piranómetros, aislamiento y corriente de fuga en mojado, constituyó una fase crítica del trabajo.

Para ello, se contó con la colaboración estratégica de la División de Aseguramiento Técnico de la Empresa de Servicios de Telecomunicaciones a los Órganos de la Defensa (DAT.SERTOD), cuya contribución fue fundamental en la materialización de los diseños. Sus principales aportes radicaron en la revisión del diseño y la fabricación del equipo, lo que garantizó que los prototipos cumplieran con las especificaciones técnicas y los estándares de calidad requeridos para la ejecución precisa y segura de los ensayos.

Enfoque metodológico

Se aplicó el método de análisis y síntesis para identificar tendencias globales y configuraciones de polígonos fotovoltaicos en diversos contextos geográficos, lo que permitió establecer un marco de referencia teórico. Estos hallazgos guiaron la fase de estudio documental, donde se consultaron y aplicaron normas internacionales (IEC), junto con manuales de buenas prácticas y guías técnicas de organismos líderes como la IEA-PVPS, lo que permitió asegurar el rigor y la validez técnica de los resultados. Finalmente, los criterios normativos y prácticas identificadas se complementaron en el método de modelación, donde mediante herramientas computacionales se desarrolló un modelo tridimensional que simuló el comportamiento de las estructuras fotovoltaicas, y validó las configuraciones propuestas. Esta articulación metodológica permitió transitar desde el conocimiento teórico global hasta la aplicación práctica específica, para garantizar coherencia entre los fundamentos técnicos, los estándares aplicables y su implementación virtual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para garantizar una distribución óptima de los elementos del polígono, se realizó un levantamiento topográfico detallado y se generó un modelo tridimensional (3D) del techo de la Facultad de Física de la Universidad de La Habana. En dicho modelo se define una zona exterior que incluye los siguientes componentes, numerados según la figura 1: 1) *set* experimental para la instalación de módulos FV a cielo abierto, 2) *set* experimental para la comparación de microinversor *vs* inversor *string*, 3) *set* experimental para la evaluación de generación con diferentes tecnologías de seguidores, 4) *set* experimental para el ensayo de medición de la característica corriente-tensión (I-U) de módulos FV a cielo abierto, 5) *set* experimental para la configuración de un laboratorio remoto, 6) *set* experimental para el ensayo de calibración de piranómetros por comparación *vs* patrón a cielo abierto, 7) ubicación del *set* de medición de radiación solar, y 8) ubicación del *set* de medición para la estación meteorológica. Esta infraestructura experimental se complementa con un laboratorio interior dispuesto en el mismo edificio, donde se ubicarán los elementos que componen el ensayo de inspección visual, aislamiento y electroluminiscencia. Este sistema integrado (zona exterior e interior) permitirá evaluar una amplia gama de tecnologías y configuraciones, que incluyen seis *sets* experimentales, dos *sets* de medición y cinco ensayos normalizados.

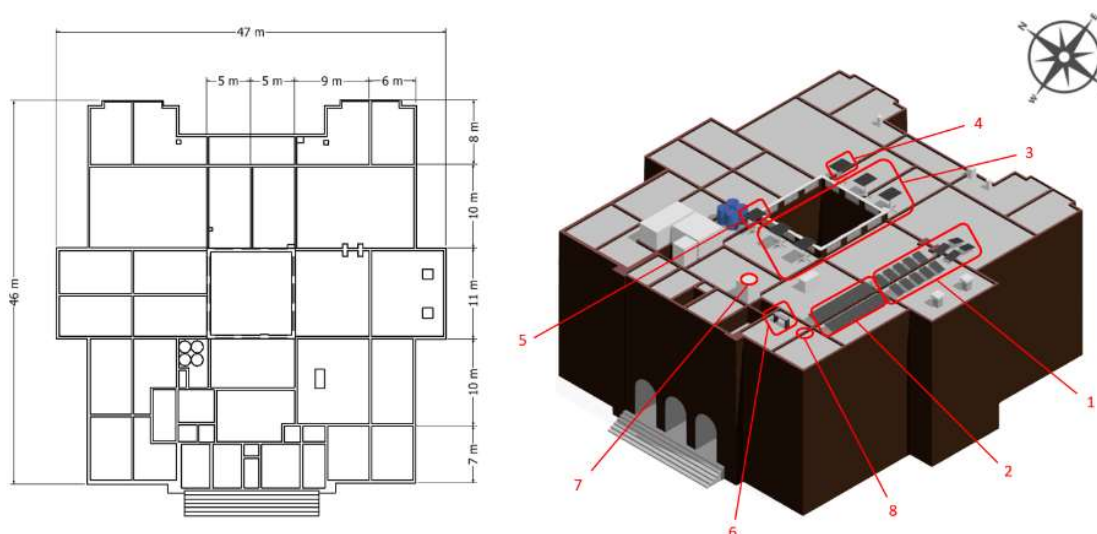


Fig. 1. Dimensionado y dibujo 3D del techo de la Facultad de Física de la Universidad de La Habana, zona exterior del polígono. Los componentes numerados en rojo fueron mencionados en el texto anterior

La selección de *sets* experimentales, *sets* de medición y ensayos normalizados se fundamentó en un análisis exhaustivo de las problemáticas más frecuentes en los módulos fotovoltaicos dentro del entorno cubano, caracterizado por altas temperaturas ambientales, elevada humedad relativa y radiación solar intensa [12], factores que provocan la necesidad de lidiar con fallas como delaminaciones [13], el deterioro del aislamiento [14], la corrosión de componentes [15] y la aparición del rastro de caracol (*snailtrail*) [16]. Para asegurar su utilidad práctica, se evitaron redundancias con pruebas ya existentes y se contemplaron posibles colaboraciones con instituciones especializadas. Además, se priorizaron los procedimientos alineados con las necesidades técnicas reales del sector. Con el fin de garantizar rigor técnico, se adoptaron como referencia normas internacionales clave: la IEC 61215, que establece los diecinueve ensayos de calidad (*MQT*) para evaluar el rendimiento y durabilidad de los módulos, y la IEC 61730, que define treinta y dos pruebas de seguridad (*MST*), sus requisitos eléctricos, mecánicos y ambientales.

La figura 2, sintetiza este análisis normativo e ilustra la aplicación de los estándares mencionados en los módulos fotovoltaicos. En ella, se relaciona la información técnica presente en la etiqueta de un módulo FV con los ensayos normativos correspondientes, los cuales se agrupan en categorías claras que facilitan su comprensión. Cabe destacar que la implementación de los mismos no solo responde a requisitos técnicos y regulatorios, sino que, al alinear los procedimientos con las normas internacionales, las buenas prácticas y las regulaciones nacionales vigentes (o estándares aplicables en su defecto), se asegura la eficiencia, vida útil y fiabilidad de las instalaciones FV. Este enfoque consolida una base técnica sólida para futuros desarrollos e investigaciones asociadas.

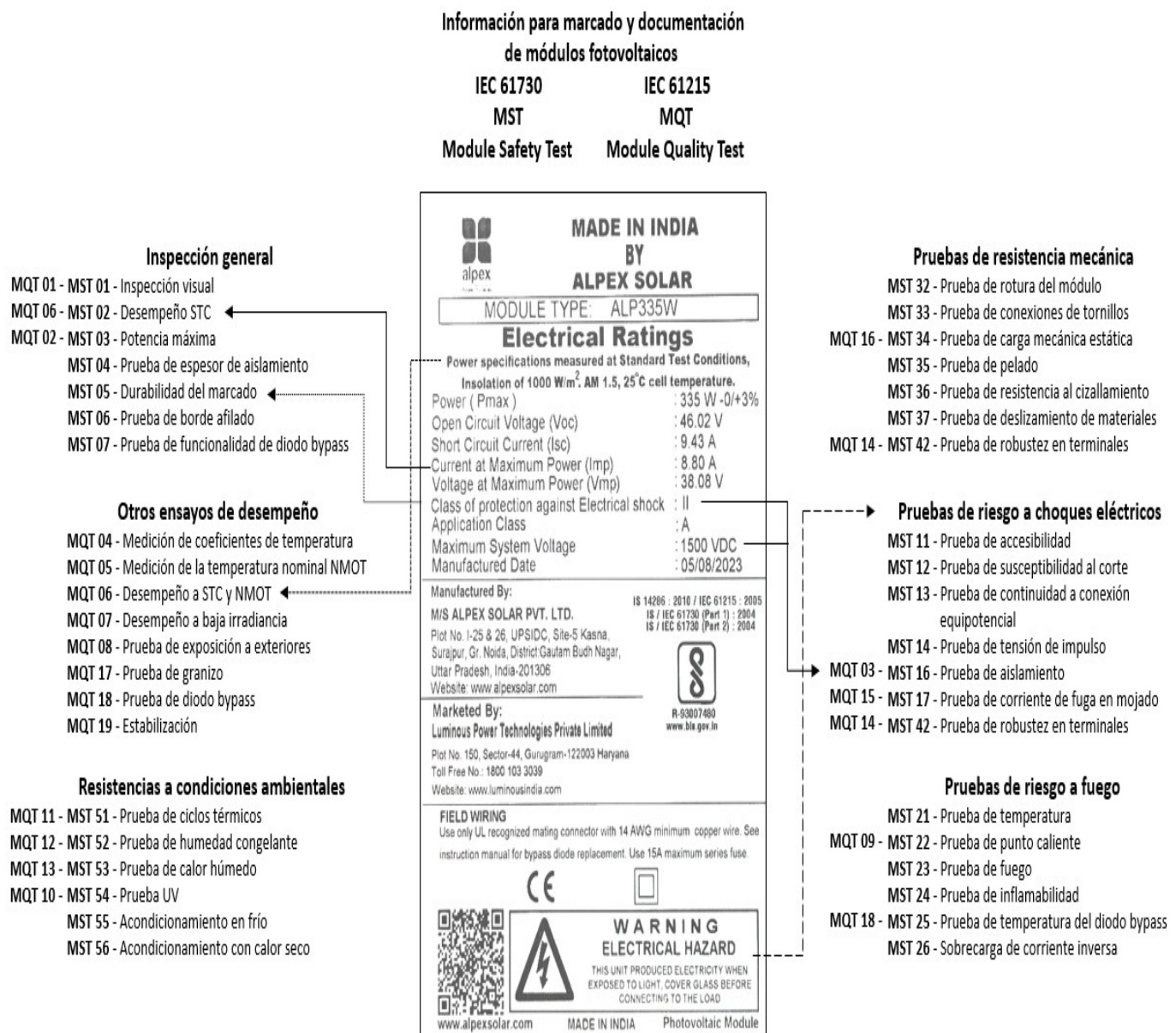


Fig. 2. Correlación entre especificaciones técnicas de módulos FV y ensayos normativos IEC: organizados en categorías: inspección visual, otros ensayos de desempeño, resistencias a condiciones ambientales, pruebas de resistencia mecánica, pruebas de riesgo a choques eléctricos y pruebas de riesgo a fuego

Bajo este contexto normativo, se procede a la descripción de los ocho *sets* mencionados (seis experimentales y dos de medición) y los cinco ensayos normalizados, para proporcionar una visión clara de los procedimientos empleados y su contribución a la evaluación integral de los dispositivos.

Descripción de sets

Set experimental para la instalación de módulos FV a cielo abierto (Set configuración)

Está diseñado para evaluar el impacto de la inclinación y orientación en la generación eléctrica de los módulos fotovoltaicos. Los resultados permitirán comparar las mediciones en condiciones reales con los resultados obtenidos mediante simulación en *PVSyst*. Consta de 14 estructuras triangulares ajustables que permiten variar el ángulo de inclinación entre 0° y 30° cuyo diseño garantiza que no existan afectaciones por sombreado entre ellos. Además integrará 4 sistemas de adquisición de datos comunicados vía *Ethernet* para la medición de la característica corriente - tensión en cada módulo. Esta información será fundamental para determinar la configuración óptima en función de las condiciones locales y maximizar la generación de energía.

Set experimental para la comparación de microinversor vs inversor string (Set inversor)

Está diseñado para evaluar el rendimiento de inversores con diferentes rangos de potencia. Consta de dos estructuras triangulares, cada una con capacidad para ocho módulos fotovoltaicos, configuradas de manera que se evite cualquier efecto de sombreado. Este diseño permite realizar una comparación directa de la generación eléctrica obtenida con cada inversor, bajo condiciones de irradiación y temperatura similares, lo que favorece la identificación de aquellos inversores que maximizan la eficiencia del sistema.

Set experimental para la evaluación de generación con diferentes tecnologías de seguidores (Set seguidor)

Los seguidores solares representan un avance tecnológico clave al incrementar la eficiencia de captación mediante el reorientamiento automático de los paneles según la variación del ángulo solar a lo largo del día [17]. Este set permitirá evaluar el desempeño de cuatro conceptos de seguidores solares comúnmente utilizados en sistemas fotovoltaicos: seguimiento de dos ejes, seguimiento polar, seguimiento horizontal norte-sur (N-S) y seguimiento horizontal este-oeste (E-W). Cada seguidor, con su propio sistema de control autónomo, estará equipado para medir la generación eléctrica y enviar los datos a un sistema centralizado a través de una red conectada a *Ethernet*. Esta configuración permitirá realizar un análisis comparativo detallado de cada tecnología, a través de factores como la generación de energía, los costos de operación y la eficiencia del seguimiento.

Set experimental para el ensayo de medición de la característica corriente-tensión (I-U) de módulos FV a cielo abierto (Set curva I-U)

Estará dispuesto para la realización del ensayo de medición de la característica I-U de módulos fotovoltaicos a cielo abierto. Se basa principalmente en las normas *IEC 60904-1:2020* e *IEC 60891:2009*, las cuales exigen que, para una medición con luz natural, el módulo en estudio sea montado en un seguidor solar de dos ejes, lo que permite orientarlo de manera que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre el módulo FV. La importancia de este procedimiento radica en proporcionar datos precisos sobre el rendimiento de los módulos en condiciones reales, lo cual es esencial para trazar la curva I-U del módulo FV y, de esta forma, conocer su eficiencia y capacidad de generación.

Set experimental para la configuración de un laboratorio remoto (Set PV Lab)

Está diseñado para desarrollar experimentos configurables y ejecutables remotamente, con el fin de medir la radiación solar y estudiar las curvas I-U de dos módulos fotovoltaicos bajo condiciones ambientales reales. El sistema integra un seguidor solar con dos paneles fotovoltaicos, un piranómetro, una cámara termográfica y un sensor de temperatura adosado a la estructura. El laboratorio será gestionado a través de una plataforma *web*, apoyada en una red LAN y dos *RaspberryPi*, que permiten ejecutar comandos específicos y almacenar los datos generados. Este sistema facilita la ejecución de experimentos con la finalidad de evaluar la calidad fotovoltaica, conforme a estándares internacionales establecidos para la valoración de módulos fotovoltaicos, además se realizará termografía infrarroja, empleando la cámara instalada en el seguidor solar y el equipo experimental para ensayos de electroluminiscencia dispuesto en condiciones controladas de laboratorio (en interior).

Set experimental para el ensayo de calibración de piranómetros por comparación vs patrón a cielo abierto (Set piranómetros)

Este set se dispondrá para el ensayo de calibración de piranómetros y consta de una mesa orientada norte-sur diseñada para fijar 12 piranómetros. Esta estructura garantiza la ausencia de sombreado durante todo el año, presenta un horizonte completamente despejado y permite la correcta nivelación de todos los sensores [18]. Su diseño minimiza las deformaciones por cambios térmicos para mantener la horizontalidad de la superficie donde se ubican los instrumentos, además de facilitar su fijación mediante pernos. El diseño fue revisado por nuestros colaboradores de DAT.SERTOD y la fabricación se realizó en los talleres de la empresa Yuri Gagarin.

Set de medición de radiación solar

Se contará con una estación automática de medición de radiación profesional junto a una infraestructura de adquisición y almacenamiento de datos para garantizar una medición de calidad de la radiación solar.

Set de medición para la estación meteorológica

Incluye una estación meteorológica automática y una infraestructura de adquisición y almacenamiento de datos para medir variables climáticas como temperatura, humedad y velocidad del viento. Su importancia radica en proporcionar datos climáticos esenciales para correlacionar el rendimiento del sistema fotovoltaico con las condiciones ambientales.

Las especificaciones técnicas de los sets experimentales se resumen en la tabla 1. Estas incluyen parámetros como: configuración, potencia nominal, variable de estudio, respuesta y objetivo.

Tabla 1. Resumen de sets experimentales y especificaciones técnicas

Especificaciones técnicas					
Sets	Configuración	Potencia nominal (kWp)	Variable de estudio	Respuesta	Objetivo
Set configuración	Estructura fija	5.6 kWp (14 módulos x 400 Wp)	<ul style="list-style-type: none"> Inclinación (0° y 30°) Orientación (10 estructuras Norte-Sur y 4 estructuras Este-Oeste) 	<ul style="list-style-type: none"> Energía generada 	<ul style="list-style-type: none"> Determinar la configuración óptima Comparar con <i>PVsystem</i>
Set inversor	Estructura fija	6.4 kWp (16 módulos x 400 Wp)	<ul style="list-style-type: none"> Tecnologías de inversores 	<ul style="list-style-type: none"> Energía generada 	<ul style="list-style-type: none"> Comparar el rendimiento y la eficiencia entre diferentes tecnologías de inversores fotovoltaicos
Set seguidor	Seguimiento solar	3.2 kWp (8 módulos x 400 Wp)	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología de seguimiento solar (2 ejes, polar, horizontal N-S, horizontal E-W) 	<ul style="list-style-type: none"> Energía generada 	<ul style="list-style-type: none"> Realizar un análisis comparativo de cada tecnología de seguimiento
Set curva I-U	Seguimiento solar	Variada	<ul style="list-style-type: none"> Módulo fotovoltaico 	<ul style="list-style-type: none"> Curva I-U Parámetros eléctricos 	<ul style="list-style-type: none"> Medir la característica I-U de módulos FV en condiciones reales, según los procedimientos descritos en las normas IEC 60904 e IEC 60891
Set PV-Lab	Seguimiento solar	0.8 kWp (2 módulos x 400 Wp)	<ul style="list-style-type: none"> Configuración del seguidor solar Parámetros ambientales monitorizados 	<ul style="list-style-type: none"> Curva I-U Parámetros eléctricos Radiación Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollar experimentos configurables y ejecutables remotamente
Set Piranómetros	Estructura fija	-	<ul style="list-style-type: none"> Piranómetros 	<ul style="list-style-type: none"> Valores de irradiancia reportados por los piranómetros 	<ul style="list-style-type: none"> Comparar los valores de radiación reportados por los piranómetros en estudio con los reportados por un patrón calibrado

Descripción de ensayos normalizados

Ensayo normalizado de inspección visual

Consiste en detectar cualquier defecto visual en el módulo, con una inspección cuidadosa bajo una iluminación no menor a 1000 luxes. Se basa en la prueba MQT-01 *Visual inspection* de la norma IEC 61215-2 que es equivalente al MST 01 de la norma IEC 61730.

Se diseñó y fabricó una mesapara facilitar el apoyo de un módulo fotovoltaico, como se muestra en la figura 3 A y 3 C, respectivamente. El proceso de revisión del diseño y su posterior fabricación se llevó a cabo en los talleres de la empresa Yuri Gagarin, gracias a la alianza de trabajo establecida con DAT.SERTOD. La estructura, estática y resistente, permite acomodar módulos de diferentes dimensiones gracias a sus dos barras móviles, que abarcan distancias de hasta 2,5 m de largo por 1,3 m de ancho. Esto facilita la colocación de módulos de gran envergadura e incluso permite adaptar tamaños mayores en el futuro.

Se utilizaron principalmente barras de hierro para construir la mesa, como se muestra en la figura 3 B, pues es un material que aporta suficiente resistencia para soportar las cargas impuestas sobre la estructura y se previene la corrosión con pintura. Se tuvo en cuenta además, que los elementos que componen la mesa están dispuestos de forma tal que no producen ningún tipo de sombreado que pueda afectar la integridad del ensayo y que permitan maximizar el impacto visual.

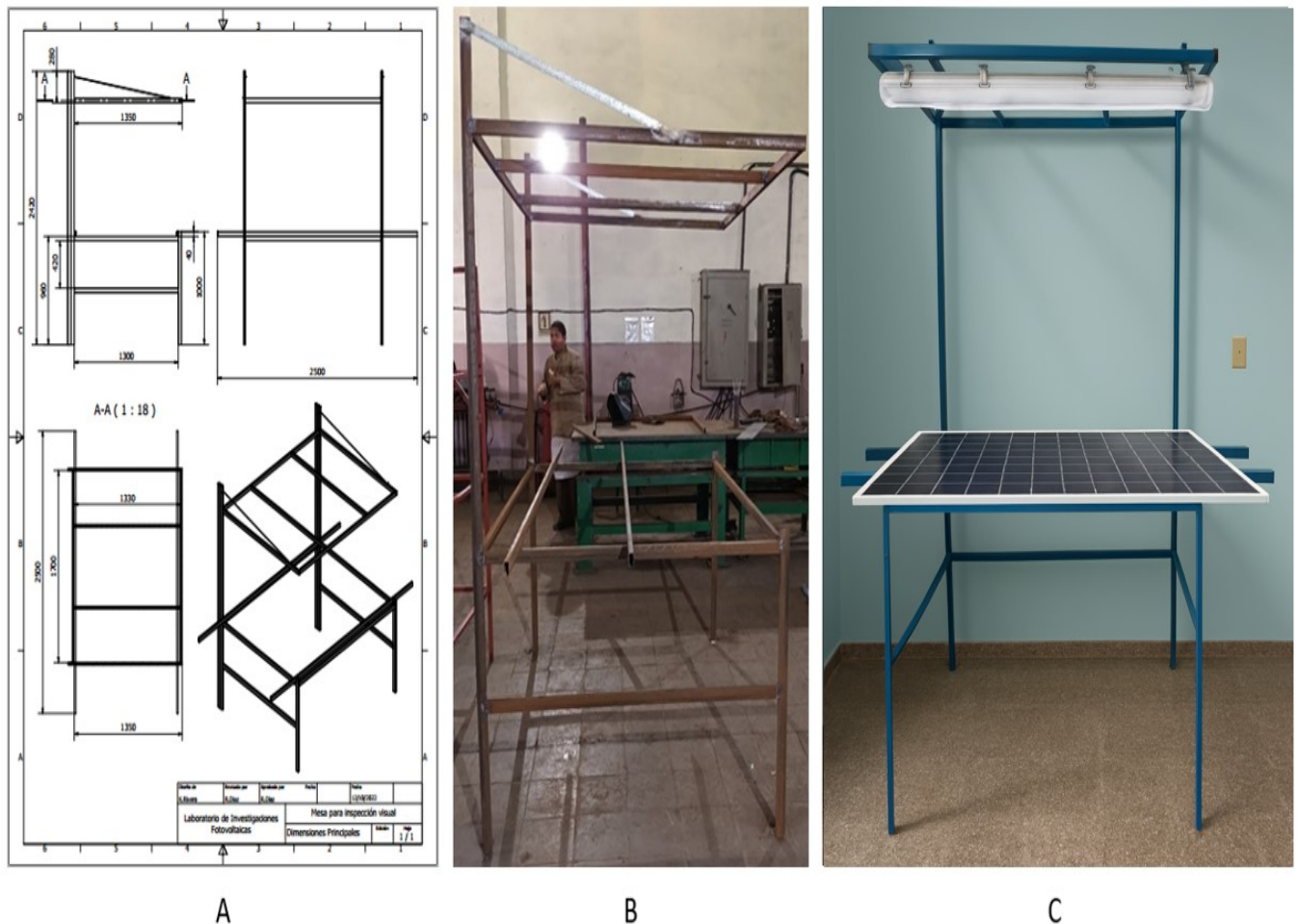


Fig. 3. Mesa para el ensayo normalizado de inspección visual. A-Diseño, B-Proceso de construcción y C-Mesa con lámparas instaladas

Ensayo normalizado de medición de la característica I-U de módulos FV a cielo abierto y de prueba de punto caliente

Describe procedimientos para la medición de la característica I-U de dispositivos fotovoltaicos bajo una fuente de luz solar natural o simulada, recomendando condiciones de irradiación entre 700 W/m^2 y 1100 W/m^2 , y un rango de temperatura en las celdas entre 25°C y 50°C . Se basa en la norma IEC 60904-1:2020 que es referenciada en el ensayo MQT-02 Maximum power determination de la norma IEC 61215-2, equivalente al MST-03 de la norma IEC 61730, así como en la MQT-09 Hot-spot endurance test de la norma IEC 61215-2, equivalente al MST-22 de la norma IEC 61730.

Como parte del proceso de perfeccionamiento y adquisición de experiencia en este experimento, se trabajó con el módulo fotovoltaico DSM-185P-CS, procedente de un conjunto de módulos retirados de parques fotovoltaicos de la Unión Eléctrica (UNE) y el SM-230PC8. Para su caracterización se empleó un trazador de curvas I-V500 y una cámara termográfica Testo 890.

Ensayo normalizado de Aislamiento y Ensayo de corriente de fuga en mojado

Es la medición de la resistencia de aislamiento entre los cables del módulo FV y su marco tanto en condiciones secas como de inmersión en agua. Se esperan obtener valores de resistencia no menores a $40 \text{ M}\Omega\cdot\text{m}^2$ para módulos con un área mayor de $0,1 \text{ m}^2$. Este ensayo se basa en las pruebas MQT-03 Insulation test y MQT-15 Wetleakagecurrent test de la norma IEC 61215-2, que son equivalentes al MST-16 y MST-17 de la norma IEC 61730.

Se realizó el diseño de la mesa para la inmersión de módulos FV, mostrada en la figura 4 A. En este caso igualmente se realizó una revisión del diseño por parte de nuestros colaboradores en DAT.SERTOD y su posterior fabricación se llevó a cabo en los talleres de la empresa Yuri Gagarin. Se propuso una estructura estática y resistente la cual permite acomodar diferentes dimensiones de módulos. Se utilizaron principalmente barras de acero y láminas de aluminio para construir la mesa, como se muestra en la figura 4 B, pues este es un material que aporta suficiente resistencia para resistir las cargas impuestas sobre la estructura y previene la corrosión.

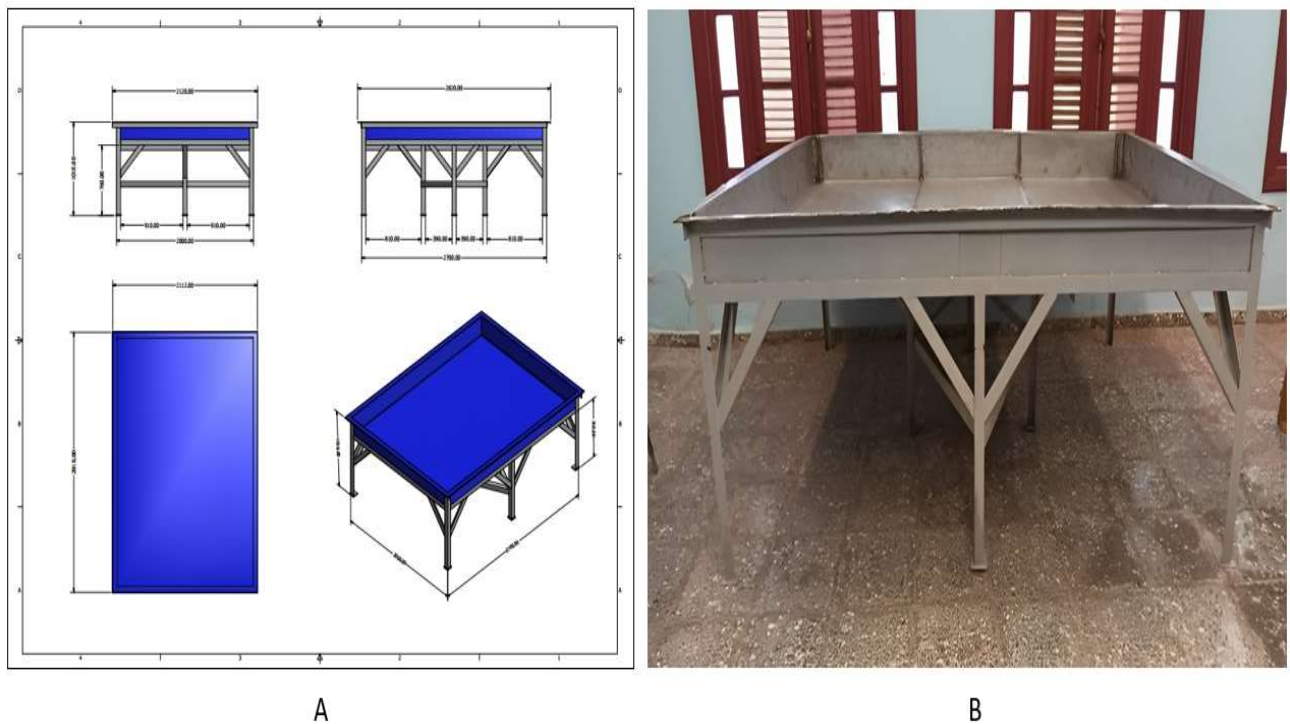


Fig. 4. Mesa para el ensayo normalizado de aislamiento y corriente de fuga en mojado. A-Diseño y B- Mesa construida

Ensayo normalizado de electroluminiscencia de laboratorio

La técnica de Electroluminiscencia consiste en obtener imágenes de un módulo FV de silicio cuando en oscuridad se hace circular una corriente en sentido inverso a como normalmente circula, convirtiendo al módulo fotovoltaico en un emisor. Para este ensayo se puede usar como referencia la norma IEC TS 60904-13, pues proporciona una guía detallada sobre cómo capturar, procesar e interpretar imágenes de electroluminiscencia para identificar los defectos internos en los módulos. Además se pueden tener como referencias los reportes de la IEA-PVPS T13-01:2014 [19] y IEA-PVPS T13-10:2018 [20].

Como parte del proceso de perfeccionamiento y adquisición de experiencia en la realización de este experimento se comenzó a trabajar con el módulo fotovoltaico UTL100-36P. Se utilizó una cámara pco. 1300 Solar, una carga electrónica de 0-100 V y 0-24 A modelo Dp1H-24P y un módulo de ALPEX SOLAR ALP335W.

Ensayo normalizado de calibración de piranómetros por comparación vs patrón a cielo abierto

Este ensayo tiene como base el ejercicio realizado del 22 al 25 de abril del 2019 en el laboratorio de fotovoltaica (LFV), donde participaron varias instituciones cubanas y extranjeras con el objetivo de adquirir competencias para la organización de una comparación de piranómetros en exterior y ser capaces de replicarlo en sus respectivas regiones. Se comparan los valores de radiación reportados por el o los piranómetros en estudio con los reportados por un patrón calibrado.

Este ensayo está basado en la norma ISO 9847 Outdoor pyranometer calibration by comparison to a reference pyranometer, la cual especifica dos métodos preferidos para la calibración de piranómetros utilizando piranómetros de referencia: interiores (Tipo A) y exteriores (Tipo B). Además se deben tener como referencia la ISO 9060:1990 y la IEC 61724. Se realizó el diseño de dos variantes: la primera compuesta principalmente por una chapa conformada, la cual será fijada sobre una base de hormigón y con una capacidad para doce piranómetros, figura 5 A, versión 1, y la segunda por barras y vigas de acero, las cuales servirán como soportes y bases de la mesa con capacidad para catorce piranómetros, figura 5 A, versión 2.

Aunque la mesa con barras de acero posee mayor capacidad y robustez, se seleccionó como la opción más viable el diseño de la mesa con chapa conformada, como se muestra en la figura 5B, debido a la simplicidad de su estructura y su sencillo proceso de construcción teniendo en cuenta la disponibilidad de materiales. En lo que finaliza la construcción de la mesa para la realización del ensayo, se realizaron ejercicios de práctica utilizando la parte superior de la misma, como se muestra en la figura 5 C y se obtuvieron varios valores de radiación durante diferentes periodos de tiempo, dispuestos en la figura 5 D. Estos ejercicios permitieron ganar experiencia para la manipulación e instalación de piranómetros y en la configuración del *datalogger*.

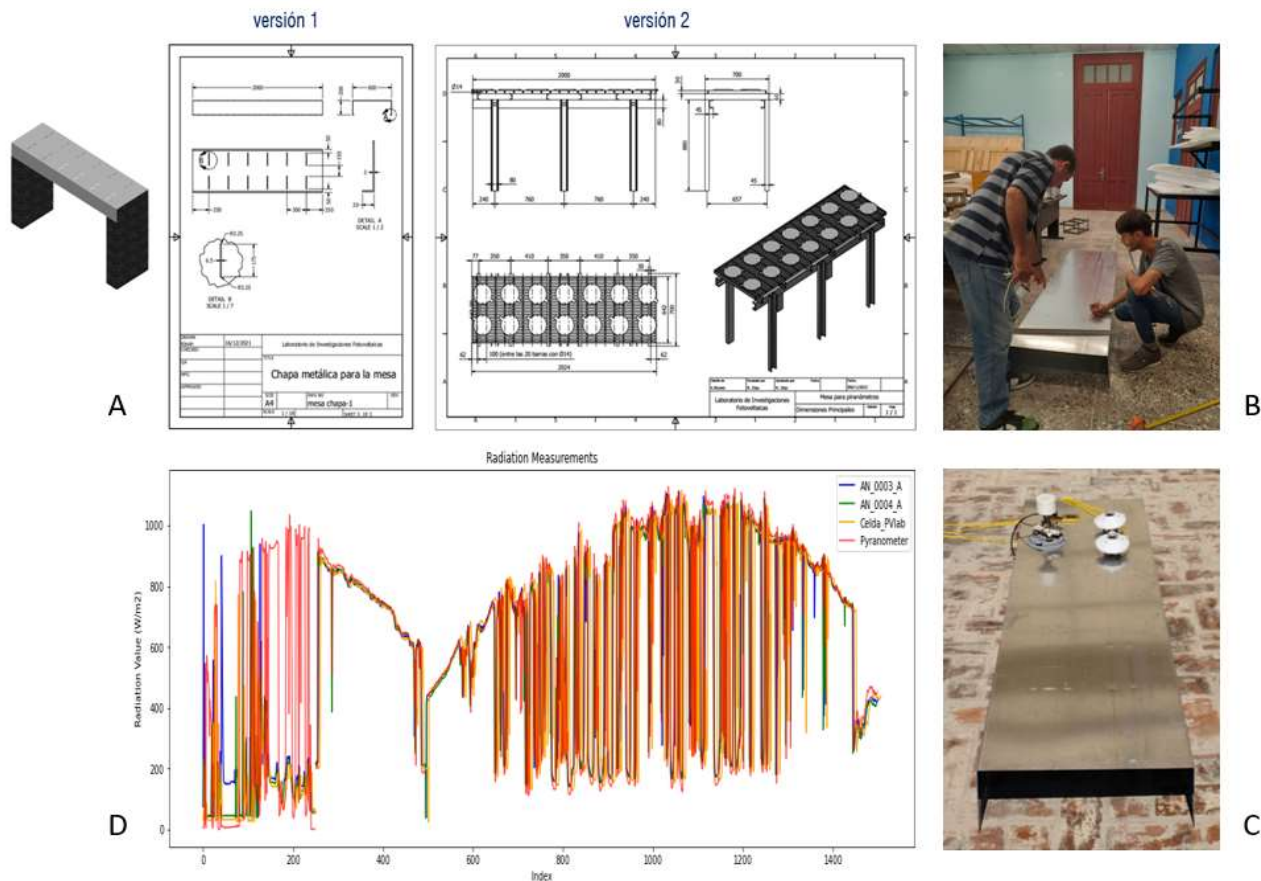


Fig. 5. Mesa para el ensayo normalizado de calibración de piranómetros. A-Variantes de diseño, B-Proceso de construcción de la versión1, C-Ejercicio de comparación de piranómetros y D-Valores de radiación obtenidos

Ejemplos demostrativos de resultados preliminares obtenidos

Como primer caso de estudio, se analizó un conjunto de cincómódulosDSM-185P-CS de un parque fotovoltaico, cedidos por la Unión eléctrica (UNE) al Polígono. El parque había presentado problemas operativos, como una tardía interconexión a la red, por lo que se sospechaba de posibles fallos de aislamiento en los módulos. Justamente el objetivo de la evaluación es corroborar esta hipótesis. A este conjunto se le realizaron las pruebas de aislamiento, termografía infrarroja, electroluminiscencia y caracterización I-U. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de aislamiento, EL y curva I-U

Módulos	Pérdidas de potencia	Resistencia (seco, $M\Omega \cdot m^2$)	Resistencia (mojado, $M\Omega \cdot m^2$)	Fallos detectados por la EL
Mod1_1304191585	-34 %	565	190	Corrosión en las barras colectoras, fracturas.
Mod2_1304198357	-90 %	955	76	El módulo no emite radiación
Mod3_1304199394	-68 %	570	70	Solo emite el centro de las celdas
Mod4_1305190458	-89 %	868	75	El módulo no emite radiación
Mod5_1305190755	-90 %	1200	250	

El trazado de la curva I-U evidenció un deterioro sustancial de la productividad en todos de los módulos, con pérdidas de potencia que superan el 60% en la mayoría y alcanzan hasta el 90%. Solo el primer módulo (Mod1) mantuvo una generación superior al 60% de su potencia nominal. Las pruebas de aislamiento descartaron que estas fallas estuvieran asociadas principalmente a fugas de corriente. La termografía arrojó un resultado interesante, las imágenes térmicas muestran una distribución homogénea en casi todos los módulos, en condiciones de circuito abierto y corto circuito, donde la variación de temperatura generalmente no sobrepasa los 10 °C. Esto implica un bajo riesgo de incendio y corrobora que la pérdida de potencia es un problema general que afecta a la estructura interna del módulo de manera homogénea.

Finalmente, las imágenes de electroluminiscencia evidencian corrosión en casi todas las barras colectoras, lo que implica una dificultad para el paso de la corriente y el continuo deterioro en los componentes de las celdas. En conjunto, estas pruebas permitieron descartar la suposición inicial de que el deterioro se debía a fallos en el aislamiento y, en su lugar, identificar la causa real de las pérdidas de potencia. La figura 6, evidencia el análisis realizado para uno de los módulos del conjunto.

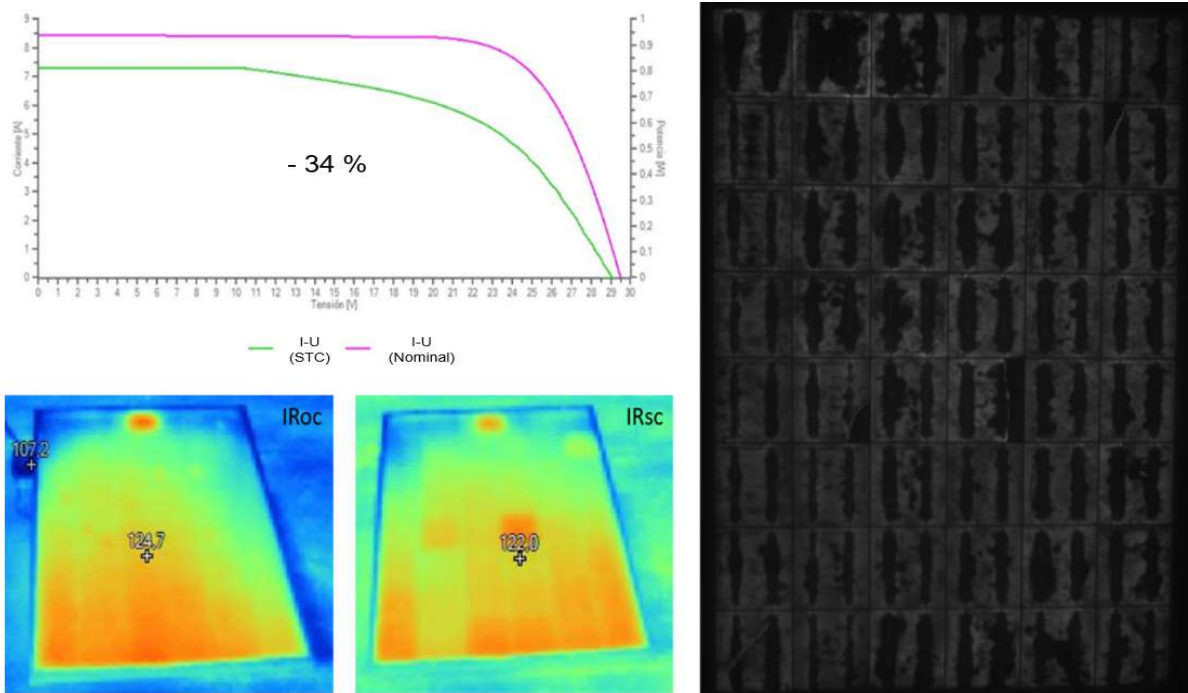


Fig. 6. Resultados de las pruebas realizadas a uno de los módulos entregados por la UNE, Mod-1304191585

Un segundo ejemplo demostrativo de gran valor práctico fue la evaluación de un conjunto de módulos recibidos como parte de un sistema fotovoltaico donado al LfV por la Alianza Solar Internacional. Una vez concluida la importación y el arribo del equipamiento al Laboratorio, se procedió a evaluarlos en presencia de los proveedores. Para esta evaluación se utilizaron los ensayos de termografía infrarroja (IR), electroluminiscencia (EL) y caracterización I-U. La figura 7, muestra simultáneamente los resultados obtenidos para uno de los módulos del conjunto, permitiendo ilustrar el valor de la utilización de estas técnicas y su utilización complementaria, para diagnosticar fallas y defectos.

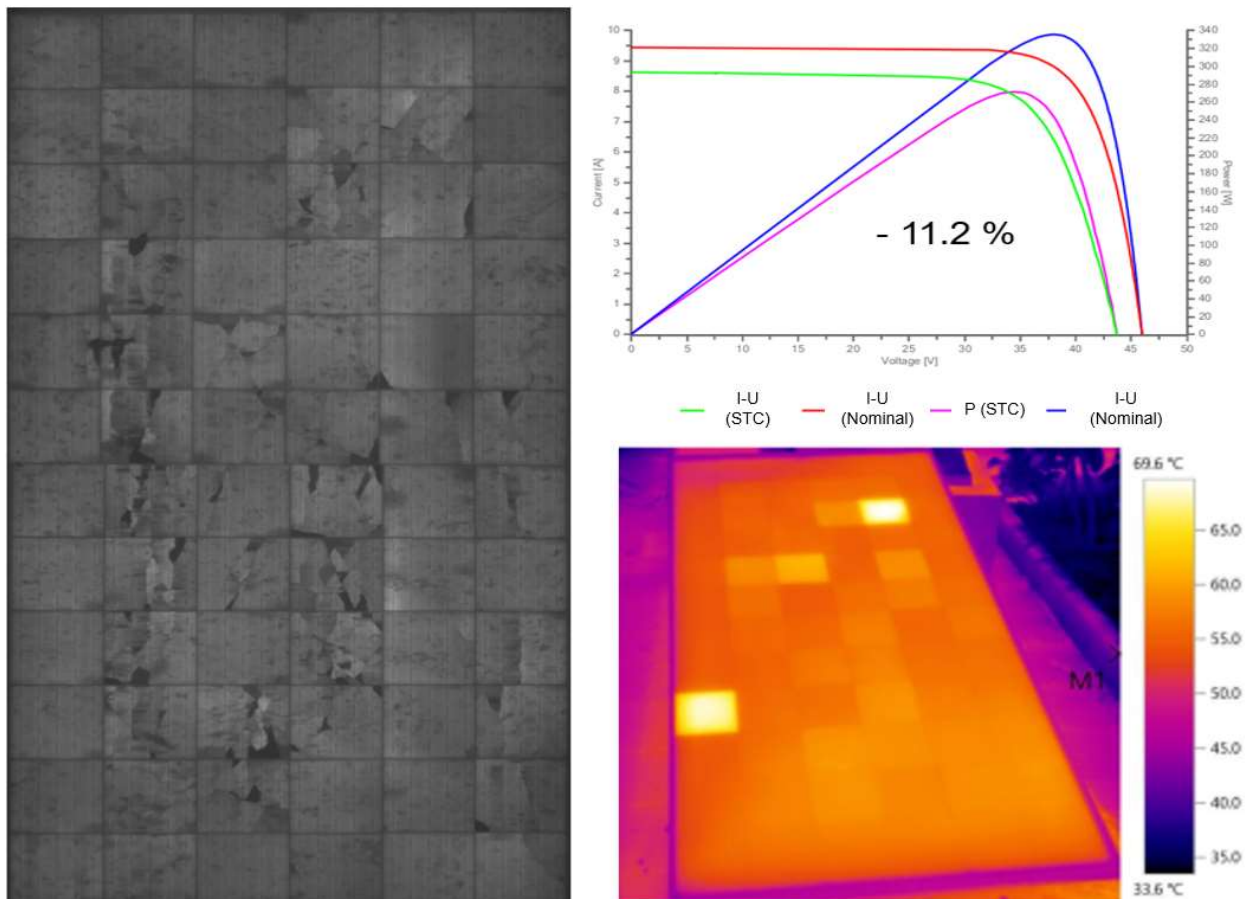


Fig. 7. Resultados de las pruebas realizadas a uno de los módulos donados por la Alianza Internacional

Como puede observarse, este módulo presenta fracturas y roturas (detectadas por EL) que presumiblemente ocurrieron en el proceso de transportación, además de celdas sobrecalentadas (detectadas con IR), concluyendo con una disminución de su potencia en un 11.2 %, lo que se consideró inaceptable para un producto tecnológico apenas adquirido. La tabla 3, muestra el resumen del lote completo.

Tabla 3. Pérdidas de potencia para el lote de módulos FV

Module ID	P max loss
15683	-11.2
17334	-11.5
17343	-12.4
17511	-18.3
17520	-11.8
17525	-12.7
21279	-10.4
21325	-11.2
21568	-15.5

Esta evaluación permitió demostrar a los proveedores que los módulos fotovoltaicos no cumplían los requisitos mínimos establecidos. Como resultado, se realizó un segundo envío que llegó en buen estado y se evitó la adquisición de módulos fotovoltaicos deteriorados.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la argumentación, conceptualización y diseño de un polígono de evaluación fotovoltaica que permite realizar evaluaciones de esta tecnología bajo las condiciones reales de Cuba. El polígono se implementa a través de la configuración de seis sets experimentales, dos sets de medición y cinco ensayos normalizados basados en normas internacionales. La selección de los sets y ensayos se fundamentó en un análisis exhaustivo de las normas de calidad y seguridad de módulos fotovoltaicos, así como de las problemáticas más frecuentes en el entorno cubano, caracterizado por altas temperaturas ambientales, elevada humedad relativa y radiación solar intensa.

Se han presentado resultados preliminares que permitieron identificar que las pérdidas sustanciales de potencia (hasta un 90%) en módulos de parques en operación se debían principalmente a corrosión de barras colectoras y fracturas internas, descartando fallos de aislamiento como causa inicial. Asimismo, en un ejemplo donde se realiza la evaluación de módulos nuevos, se evidenciaron defectos de fabricación y daños por transporte, con pérdidas promedio superiores al 11%, validando su utilidad como herramienta de control de calidad. Finalmente, se concluye que este polígono no solo es una plataforma académica y de investigación, sino también una herramienta de política tecnológica que contribuye a la transición energética sostenible en Cuba, proporcionando datos confiables para la toma de decisiones y la mejora normativa.

REFERENCIAS

- [1]. Niño, Y., *et al.* "Desafíos de la transición energética sostenible: perspectivas para la investigación y la gestión". *Rev Fac Cienc Económicas*. 2023, vol. 31, n. 2, p. 137-58. ISSN 0121-6805. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-68052023000200137
- [2]. Bouich, A., *et al.* "Opportunities, Challenges, and Future Prospects of the Solar Cell Market". *Sustainability*. 2023, vol. 15, n. 21. ISSN 2071-1050. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/21/15445>
- [3]. Tabakovic, M., *et al.* "Analysis of the Technological Innovation System for BIPV in Austria: Report IEA-PVPS T15-21:2024". International Energy Agency. Francia. 2024. p. 51. ISBN 978-3-907281-59-8. Disponible en: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/09/IEA-PVPS-T15-21-2024-REPORT-Austria-TIS-BIPV.pdf>
- [4]. Martín, N., *et al.* "Rings-BIPV Project: Analysis of PV Solutions for Retrofitting Buildings under Mediterranean Climate Conditions". 40th Eur Photovolt Sol Energy Conf Exhib. Lisbon, Portugal, 2023. Disponible en: https://rings-bipv.com/wp-content/uploads/2024/03/4BV.4.3_RINGS-BIPV-Project-Analysis-of-PV-Solutions-for-Retrofitting-Buildings-under-Mediterranean-Climate-Conditions-%E2%80%93-EUPVSEC-2023.pdf
- [5]. Torres, J., *et al.* "Plug and Play Modular Façade Construction System for Renovation for Residential Buildings". *Buildings*. 2021, vol. 11, n. 9, p. 419. ISSN 2075-5309. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/9/419>

- [6]. Natural Resources Canada. "Factsheet: Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)". Canada: Natural Resources. 2018. Disponible en: https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/energy/pdf/solar-photovoltaic/NRCan_BIPV_Factsheet_EN.pdf
- [7]. Abraim, M., *et al.* "Performance Enhancement and Control of Photovoltaic Systems". Elsevier. España, 2024. p. 181-96. ISBN 978-0-443133-93-0. Disponible en: <https://shop.elsevier.com/books/performance-enhancement-and-control-of-photovoltaic-systems/motahhir/978-0-443-13392-3>
- [8]. Saw, H., *et al.* "Reliability of floating photovoltaics (FPV): evaluating the effects of hydrodynamic mechanical loads on photovoltaic modules". *Jpn J Appl Phys.* 2025, vol. 64, n. 4. ISSN 1347-4065. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1347-4065/adc585>
- [9]. Eder, G., *et al.* "BIPV research teams & BIPV R&D facilities An international mapping, second version". IEA PVPS. Francia, 2019. ISBN 978-3-906042-90-9. Disponible en: <https://iea-pvps.org/key-topics/bipv-research-teams-bipv-rd-facilities-an-international-mapping-second-version/>
- [10]. Stolik D. "Energía fotovoltaica para Cuba". Cubasolar, Cuba. 2019. ISBN 978-959-7113-59-1. Disponible en: <https://isbncuba.ccl.cerlalc.org/catalogo.php?mode=detalle&nt=37401>
- [11]. Iturralde, L., *et al.* "Methodology for the integration of photovoltaic solar installations in hotel buildings in the Caribbean". *Universidad y Sociedad.* 2024, vol. 16, n. 1. ISSN 2218-3620. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202024000100174
- [12]. Barcia, S., *et al.* "Comparison of different bioclimatic index in Cuba". *Revista Cubana de Meteorología.* 2020, vol. 26, n. 3. ISSN 0864-151X. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-08802020000300008
- [13]. Espinosa, A., *et al.* "Efecto de la temperatura en la eficiencia de paneles fotovoltaicos". *Pädi Bol Científico Cienc Básicas E Ing ICBI.* 2023, vol. 11, n. 5, p. 184-90. ISSN 2007-6363. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/download/11841/10933&ved=2ahUKEwibz_zd9fmRAxUISjABHa1yNE0QFnoECCMQAQ&usq=AOvVaw1V8b2LRuFBssN9qTwCLERZ
- [14]. Poulek, V., *et al.* "PV Panel and PV Inverter Damages Caused by Combination of Edge Delamination, Water Penetration, and High String Voltage in Moderate Climate". *IEEE J Photovolt.* 2021, vol. 11, n. 2, p. 561-565. ISSN 2156-3403. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9339850>
- [15]. Sommeling, P., *et al.* "Corrosion effects in bifacial crystalline silicon PV modules; interactions between metallization and encapsulation". *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2023, vol. 256. ISSN 0927-0248. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/371975876_Corrosion_effects_in_bifacial_crystalline_silicon_PV_modules_interactions_between_metallization_and_encapsulation
- [16]. Ko, J., *et al.* "Annealing-free fluoropolymer protective layer for mitigating snail trails in crystalline silicon photovoltaic modules". *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2025, vol. 283. ISSN 0927-0248. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/390099163_Annealing-Free_Fluoropolymer_Protective_Layer_for_Mitigating_Snail_Trails_in_Crystalline_Silicon_Photovoltaic_Modules
- [17]. García, R., *et al.* "Prototipo de seguidor solar automático con red neuronal para maximizar la energía fotovoltaica". *RICT Revista de Investigación Científica, Tecnología e Innovación.* 2024, vol. 2, n. 4, p. 30-35. ISSN 2992-7315. Disponible en: <https://revista.ccaite.com/index.php/ridt/article/view/106>
- [18]. Rayo, E., *et al.* "DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN BANCO DE COMPARACIÓN PIRANOMÉTRICA EN CENAM y UACM". 17mo Congreso Ibérico y 13ro Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Lisbon, Portugal. 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/371474706_DESARROLLO_Y_VALIDACION_DE_UN_BANCO_DE_COMPARACION_PIRANOMETRICA_EN_CENAM_y_UACM
- [19]. Köntges, M., *et al.* "Review of Failures of Photovoltaic Modules". IEA International Energy Agency. Francia. 2014. ISBN 978-3-906042-16-9. Disponible en: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf
- [20]. Jahn, U., *et al.* "Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications". IEA International Energy Agency. Francia. 2018. ISBN 978-3-906042-53-4. Disponible en: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Review_on_IR_and_EL_Imaging_for_PV_Field_Applications_by_Task_13.pdf

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Kevin Rivero Crespo: <https://orcid.org/0000-0002-5616-6195>

Levantamiento topográfico detallado, generación del modelo 3D. Participó en la revisión del estado del arte, conceptualización y diseño del polígono, puesta en marcha de los ensayos normalizados y sets experimentales, recolección de datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

René Díaz Suárez: <https://orcid.org/0000-0002-2773-9708>

Participó en la revisión del estado del arte, conceptualización y diseño del polígono, puesta en marcha de los ensayos normalizados y sets experimentales, recolección de datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Josué Benavides Esteva: <https://orcid.org/0000-0001-9946-5411>

Participó en la revisión del estado del arte, puesta en marcha de los ensayos normalizados y sets experimentales, recolección de datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Raciel Márquez Saurí: <https://orcid.org/0009-0001-2660-6823>

Participó en el proceso de revisión del diseño y su posterior fabricación, recolección de datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Omar Borrego Deulofeu: <https://orcid.org/0009-0009-8858-8841>

Participó en el proceso de revisión del diseño y su posterior fabricación, recolección de datos, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Lídice Vaillant-Roca: <https://orcid.org/0000-0003-1552-7449>

Participó en la revisión del estado del arte, conceptualización y diseño del polígono, coordinación y gestión de financiamiento, puesta en marcha de los ensayos normalizados y sets experimentales, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.