



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**“INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA
ECONÓMICA QUE PERMITA EVALUAR LA EFICIENCIA Y RENDIMIENTO DE
PANELES SOLARES MONOCRISTALINOS Y POLICRISTALINOS EN
CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN”.**

PARA OPTAR AL GRADO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

PRESENTADO POR:
VICTOR ERNESTO PAULA SALAZAR

SANTA TECLA, SEPTIEMBRE DE 2025



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

ING. ROSENDO MAURICIO SERMEÑO PALACIOS
RECTOR

ING. FRANCISCO ALFREDO CARRILLO LARREYNAGA
VICE-RECTOR

ING. ROOSELVET ADOLFO OSORIO
SECRETARIO GENERAL

LIC. CARLOS ALBERTO COCA MUÑOZ
FISCAL

ING. MAURICIO ANTONIO AGUIRRE ORELLANA
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

ING. RENÉ EDUARDO CUÉLLAR FIGUEROA
DIRECTOR DE ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SANTA TECLA, SEPTIEMBRE DE 2025



ASESOR

ING. FRANCISCO ERNESTO COLORADO GUTIÉRREZ

JURADO EVALUADOR

ING. GUSTAVO RAÚL ALFARO

ING. FRANCISCO ANTONIO OLMEDO ALAS

ING. JOSÉ ALEXANDER RAMÍREZ HERNÁNDEZ

SANTA TECLA, SEPTIEMBRE DE 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA LATINOAMERICANA

ACTA DE CALIFICACIÓN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

No. TRES MIL QUINIENTOS VEINTIOCHO

A las ocho horas y treinta minutos del sábado trece de septiembre de dos mil veinticinco. Reunidos los Miembros del Tribunal Examinador del Trabajo de Graduación presentado por VICTOR ERNESTO PAULA SALAZAR en el salón de sesiones de la UNIVERSIDAD TÉCNICA LATINOAMERICANA. Se procedió:

PRIMERO: Que habiendo analizado el Trabajo de Graduación titulado:

"INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA ECONÓMICA QUE PERMITA EVALUAR LA EFICIENCIA Y RENDIMIENTO DE PANELES SOLARES MONOCRISTALINOS Y POLICRISTALINOS, EN CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN."

Se dio por aprobada, la parte escrita.

SEGUNDO: Que, con base a dicha aprobación de la parte escrita, se procedió a instalar la respectiva defensa oral del trabajo.

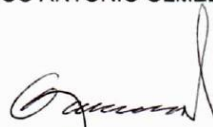
De conformidad a los resultados en dicha defensa, este Tribunal Examinador acuerda dar por APROBADA, con una calificación de NUOVE PUNTO CINCO (9.5), el Trabajo de Graduación presentado por el alumno arriba detallado obteniendo a partir de esta fecha su calidad de: INGENIERO EN ELECTRONICA

No habiendo más que hacer constar, damos por terminada el acta que firmamos.


ING. GUSTAVO RAUL ALFARO


ING. JOSE ALEXANDER RAMIREZ HERNANDEZ


ING. FRANCISCO ANTONIO OLMEDO ALAS


ING. ROOSELVEY ADOLFO OSORIO
SECRETARIO GENERAL



DEDICATORIA

A mi familia, cuyo amor, paciencia y apoyo incondicional han sido fundamentales a lo largo de este camino. Su confianza en mí ha sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes.

A cada jornada de trabajo silencioso, a cada instante de esfuerzo sostenido que hoy se ve reflejado en este logro académico. Este trabajo es también fruto de la disciplina, la perseverancia y el compromiso personal.

Por encima de todo, a Dios, por darme la fortaleza, el empuje, la visión, la sabiduría y la claridad para avanzar con firmeza en este proyecto.

A Él, toda la gloria, la honra y el poder.

Con profundo agradecimiento,

Víctor Ernesto Paula Salazar

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	14
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1 Antecedentes y/o generalidades del problema.....	18
1.2 Formulación del problema.	19
1.3 Descripción del problema.....	19
1.4 Importancia de la investigación.....	21
1.5 Justificación.	21
1.6 Objetivos	23
1.6.1 Objetivo general	23
1.6.2 Objetivos específicos	23
1.7 Alcance.....	24
1.8 Limitantes del problema.....	24
1.9 Delimitación del problema.....	25
CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA.....	26
2.1 Marco histórico.....	27
2.1.1 Evidencia comparativa reciente sobre tecnologías fotovoltaicas.....	29
2.2 Marco teórico.	31
2.3 Marco conceptual.	35
2.3.1 Eficiencia Energética	35
2.3.2 Punto de Máxima Potencia (MPPT)	35
2.3.3 Curva I-V.....	35
2.4 Marco legal.	35
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	37
3.1 Identificación de los paneles solares a evaluar (monocristalinos y policristalinos).	38
3.2 Medición de irradiancia solar y temperatura ambiental utilizando el medidor SM206..	38
3.3 Evaluación de parámetros eléctricos (Voc, Isc, Vmp, Imp)	39
3.4 Análisis de la curva I-V	41
3.5 Análisis de Datos	42

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.	43
4.1 Instrumentación utilizada.....	44
4.1.1 Medidor de irradiancia SM206	44
4.1.2 Multímetro solar EL400B.....	47
4.1.3 Carga electrónica DL24.....	53
4.2 Resultados del Panel Monocristalino	54
4.3 Resultados del Panel Policristalino	81
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	109
5.1 Validación experimental de la metodología en condiciones reales	110
5.2 Fundamento y alcance de los experimentos	111
5.3 Instrumentación empleada y procedimiento.....	111
5.4 Resultados experimentales y análisis comparativo.....	113
5.5 Conclusiones basadas en resultados comparativos	115
5.6 Análisis comparativo con la literatura especializada y recomendación tecnológica.....	116
5.7 Conclusiones generales.....	118
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	120
6.1 Conclusiones.....	121
6.2 Recomendaciones	122
CRONOGRAMA DE TRABAJO	124
BIBLIOGRAFÍA.....	125
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1:. Beneficios esperados de la metodología propuesta por área de impacto	23
Tabla 2: Datos recopilados durante las pruebas de carga al Panel FV Monocristalino	57
Tabla 3: Datos recopilados durante las pruebas de carga al Panel FV Policristalino	84
Tabla 4: Parámetros: descripción técnica y formulación	112
Tabla 5: Resultados experimentales y análisis comparativo	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráficas de corriente, potencia y voltaje de una celda fotovoltaica.....	34
Figura 2: Metodología para evaluar paneles solares.....	42
Figura 3: Medidor de irradiancia SM206-SOLAR	44
Figura 4: Medidor multímetro solar EL400B	48
Figura 5: Carga electrónica DL24P (180 Watts)	53
Figura 6: Evolución temporal en parámetros eléctricos de panel Monocristalino	77
Figura 7: Curva característica de corriente contra voltaje (I-V) – Panel Monocristalino.....	77
Figura 8: Curva P-V del Panel Solar Monocristalino	78
Figura 9: Curva de I-V-P Panel Monocristalino 50W. (22 de Marzo 2025).	78
Figura 10: Medición de irradiancia durante ensayo al Panel Monocristalino	80
Figura 11: Medidor multímetro solar EL400B (Panel Monocristalino)	80
Figura 12: Temperatura °C tomada a panel FV Monocristalino (prueba en campo)	81
Figura 13: Evolución temporal en parámetros eléctricos de panel Policristalino.....	84
Figura 14: Curva característica de corriente contra voltaje (I-V) – Panel Policristalino....	102
Figura 15: Curva P-V del Panel Solar Policristalino	103
Figura 16: Curva de I-V-P Panel Policristalino 50W. (22 de Marzo 2025)	103
Figura 17: Medición de irradiancia durante ensayo al Panel Policristalino	105
Figura 18: Medidor multímetro solar EL400B (Panel Policristalino)	106
Figura 19: Temperatura °C tomada a panel FV Policristalino (prueba en campo).....	106
Figura 20: Módulo EGE-50-P36 en arreglo de prueba en campo	107

GLOSARIO.

- **Área efectiva del panel:** Superficie activa del módulo fotovoltaico sobre la cual incide la irradiancia solar. Se calcula a partir de las dimensiones útiles del panel y se emplea para determinar la densidad de potencia generada (W/m^2).
- **CC: Modo corriente constante.** Modo de operación de la carga DL24P en el cual se fija un valor de corriente constante mientras se mide la tensión. Se utiliza para generar curvas I-V del panel solar.
- **Coeficiente térmico de potencia:** Parámetro proporcionado por el fabricante del panel que indica la variación porcentual de la potencia de salida por cada grado Celsius de incremento de temperatura. Su valor es negativo y se expresa como $\%/^{\circ}\text{C}$.
- **Curva I-V:** Gráfico que representa la relación entre la corriente (A) y la tensión (V) de un panel solar. Se utiliza para caracterizar su comportamiento eléctrico bajo diferentes condiciones de carga.
- **Curva P-V:** Gráfico que relaciona la potencia eléctrica generada con la tensión de salida del panel. Permite identificar el punto de máxima potencia (P_{max}).
- **Densidad de potencia:** Potencia generada por unidad de área del panel (W/m^2). Se calcula dividiendo la potencia máxima medida (P_{max}) entre el área efectiva del panel.
- **Disipación térmica:** Capacidad del sistema (como la DL24P) de manejar el calor generado durante las pruebas de carga. Es esencial para evitar sobrecalentamientos y mantener precisión en la medición.
- **DL24P:** Carga electrónica que permite aplicar cargas variables en diferentes modos (CC, CV, CR, CP) sobre una fuente DC como un panel solar. Utiliza un MOSFET de potencia y permite la obtención de curvas I-V y P-V.
- **Eficiencia del panel:** Relación porcentual entre la potencia máxima generada por el panel (P_{max}) y la potencia solar incidente sobre su superficie activa. Se expresa como: $\eta = (P_{\text{max}} / (G \times A)) \times 100$.
- **EL400B:** Multímetro solar especializado en la obtención de parámetros eléctricos característicos del panel, como V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} y P_{max} . Integra algoritmo de seguimiento MPPT.

- **Ensayo en campo:** Procedimiento experimental realizado fuera de laboratorio, en condiciones reales de operación, para medir el desempeño de paneles solares utilizando instrumentación portátil.
- **Imp: Corriente en máxima potencia.** Corriente que entrega el panel cuando se encuentra operando en el punto de máxima potencia (MPP). Se usa para dimensionar cargas e inversores.
- **Instrumentación portátil:** Conjunto de dispositivos electrónicos como el SM206, EL400B y DL24P que permiten realizar mediciones en campo con alta precisión sin requerir infraestructura de laboratorio.
- **Irradiancia solar:** Cantidad de energía solar que incide sobre una superficie por unidad de área, medida en W/m^2 . Es un parámetro esencial para determinar el rendimiento real del panel.
- **Isc: Corriente de cortocircuito.** Valor máximo de corriente que puede entregar un panel solar cuando sus terminales están en cortocircuito (tensión igual a cero). Se utiliza para evaluar la respuesta de la celda bajo máxima irradiancia.
- **Medición puntual de irradiancia:** Lectura instantánea de la irradiancia solar en un momento específico durante el experimento. Permite contextualizar los datos eléctricos del panel bajo una condición lumínica determinada.
- **MOSFET de potencia:** Transistor de efecto de campo utilizado en la DL24P como elemento de carga variable. Su resistencia interna se controla para simular diferentes tipos de carga eléctrica.
- **MPP: Punto de máxima potencia.** Condición en la cual el producto de tensión y corriente ($V \times A$) alcanza su valor máximo. Es el punto ideal de operación del panel solar para extraer la máxima energía disponible.
- **Panel monocristalino:** Tipo de módulo solar fabricado a partir de un solo cristal de silicio. Presenta mayor eficiencia energética y mejor desempeño en condiciones de baja irradiancia en comparación con el policristalino.
- **Panel policristalino:** Tipo de módulo solar compuesto por múltiples cristales de silicio. Tiene menor eficiencia que el monocristalino, pero su costo de fabricación es más bajo.

- **Pérdidas por temperatura:** Reducción en la potencia generada por el panel debido al aumento de su temperatura respecto al valor nominal. Se estima usando el coeficiente térmico.
- **Pmax: Potencia máxima.** Potencia máxima que un panel puede generar bajo condiciones específicas. Se determina empíricamente como el producto entre V_{mp} e I_{mp} .
- **Rendimiento real del panel:** Capacidad del panel para generar energía en condiciones reales de operación (temperatura, irradiancia, orientación, etc.), comparado con su especificación nominal bajo STC.
- **Resistencia de carga:** Elemento que absorbe potencia eléctrica del panel durante la prueba. En la DL24P esta resistencia es electrónica y controlable.
- **Simulación de carga:** Método utilizado para imitar el comportamiento de una carga real sobre el panel durante la prueba. Se realiza con dispositivos como la carga DL24P.
- **SM206:** Medidor de potencia solar portátil que mide la irradiancia incidente sobre el plano del panel, expresada en W/m^2 . Utilizado en campo para evaluar condiciones reales de radiación solar.
- **STC: Condiciones estándar de prueba.** Parámetros de laboratorio establecidos para la evaluación comparativa de paneles: $1000 W/m^2$ de irradiancia, $25\text{ }^{\circ}C$ de temperatura de celda y un espectro AM1.5.
- **Tasa de variación térmica:** Cambio de temperatura por unidad de tiempo medido durante las pruebas. Sirve para interpretar el efecto acumulativo del calor sobre la eficiencia del panel.
- **Temperatura del panel:** Temperatura de la superficie posterior del módulo fotovoltaico. Es un factor crítico que afecta negativamente la eficiencia del panel cuando supera los valores estándar.
- **Tiempo de estabilización:** Período durante el cual se deja estabilizar la lectura del panel antes de registrar mediciones, con el fin de obtener datos representativos y comparables.

- **Vmp: Tensión en máxima potencia.** Tensión que presenta el panel cuando se encuentra operando en su punto de máxima potencia (MPP). Es clave para el diseño de sistemas MPPT y selección de inversores.
- **Voc: Tensión en circuito abierto.** Tensión máxima del panel cuando no existe carga conectada. Representa el punto de la curva I-V donde la corriente es cero.

INTRODUCCIÓN.

La creciente demanda de energías renovables ha posicionado a la energía solar como una de las alternativas más viables para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental. En este contexto, la eficiencia y el rendimiento de los paneles solares son factores críticos que determinan su adopción y efectividad en aplicaciones reales. Sin embargo, la evaluación de estos parámetros suele requerir equipos costosos y metodologías complejas, lo que limita su accesibilidad para comunidades, pequeñas empresas e instituciones educativas con recursos limitados. Este proyecto de graduación, titulado "Investigación, Desarrollo y Validación de una Metodología Económica para Medir Eficiencia y Rendimiento de Paneles Solares Monocristalinos y Policristalinos en Condiciones Reales de Operación", surge como una respuesta innovadora a esta problemática.

Este proyecto de graduación, titulado "Investigación, Desarrollo y Validación de una Metodología Económica para Medir Eficiencia y Rendimiento de Paneles Solares Monocristalinos y Policristalinos en Condiciones Reales de Operación", surge como una respuesta innovadora a esta problemática. En este sentido, el objetivo general de esta investigación es diseñar y validar una metodología accesible y económica que permita medir con precisión el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos en condiciones reales de operación, utilizando instrumentos de bajo costo. A través de un enfoque experimental, se evalúan paneles monocristalinos y policristalinos, comparando su eficiencia bajo distintas condiciones ambientales, como irradiancia solar y temperatura. Los resultados obtenidos no solo contribuyen al campo de la energía solar, sino que también democratizan el acceso a herramientas de evaluación, facilitando su implementación en contextos con recursos limitados.

Este documento se encuentra estructurado en seis capítulos que permiten guiar al lector a lo largo del proceso investigativo, desde la identificación del problema hasta la validación experimental y las recomendaciones finales. El Capítulo I, denominado Planteamiento del Problema, aborda de manera detallada los antecedentes y generalidades asociadas a la necesidad de contar con metodologías accesibles para la evaluación del rendimiento de

paneles solares. En este apartado se expone la formulación del problema, se describe su contexto técnico y económico, y se justifica la pertinencia del estudio. Asimismo, se establecen el objetivo general y los objetivos específicos, orientados al diseño de una metodología económica y replicable, adecuada para contextos con recursos limitados.

El Capítulo II desarrolla el Marco de Referencia, el cual se subdivide en los marcos histórico, teórico, conceptual y legal. Este capítulo proporciona los fundamentos técnicos que sustentan la investigación, incluyendo conceptos esenciales como el efecto fotovoltaico, la curva característica I-V, el punto de máxima potencia (MPPT), y los estándares internacionales aplicables a la evaluación del rendimiento de módulos solares. Además, se presentan definiciones clave que permiten comprender con precisión los parámetros medidos y las condiciones de operación reales de los sistemas fotovoltaicos.

En el Capítulo III se describe la Metodología de la Investigación, en la que se detalla el enfoque experimental seguido para la validación de la propuesta. Se incluye la descripción de los instrumentos económicos utilizados para la toma de datos, como el medidor de irradiancia SM206, el multímetro solar EL400B y la carga electrónica DL24, así como los procedimientos para la medición de parámetros eléctricos críticos, el trazado de curvas I-V y P-V, y el cálculo de eficiencia bajo diferentes condiciones ambientales.

El Capítulo IV, titulado Resultados y Validación Experimental, presenta los datos obtenidos a partir de la aplicación de la metodología en campo, tanto para paneles solares monocristalinos como policristalinos. Se exponen tablas con valores medidos, gráficas resultantes y análisis técnicos que permiten visualizar el comportamiento de los módulos bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. Este apartado constituye la base empírica que respalda la efectividad de la metodología diseñada.

En el Capítulo V se realiza la Discusión de Resultados, contrastando los hallazgos experimentales con los objetivos planteados y con la teoría revisada en capítulos anteriores. Se identifican los factores que afectan la eficiencia real de los paneles y se analizan las

fortalezas y limitaciones del método propuesto, considerando su aplicabilidad en contextos educativos, comunitarios o de pequeña escala productiva.

Finalmente, el Capítulo VI recoge las Conclusiones y Recomendaciones, donde se sintetizan los principales logros del estudio, se destacan sus contribuciones al ámbito de la energía solar descentralizada y se proponen futuras líneas de investigación para mejorar y ampliar la implementación de esta metodología. Se reafirma, en este apartado, el compromiso del proyecto con la promoción de tecnologías limpias, sostenibles y económicamente viables para una transición energética inclusiva.

Este trabajo no solo aporta una solución práctica para la evaluación de paneles solares, sino que también promueve la educación en energías renovables y el desarrollo sostenible. Al reducir las barreras económicas y técnicas, se espera que esta metodología impulse la adopción de energía solar en comunidades y sectores con menos recursos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En las siguientes páginas, se profundizará en cada uno de estos aspectos, proporcionando un análisis detallado que combina rigor técnico con aplicabilidad real.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1 Antecedentes y/o generalidades del problema.

La generación de energía mediante paneles solares fotovoltaicos ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas, impulsada por la necesidad global de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2023), la capacidad instalada global de energía solar superó los 1,177 GW en 2022, representando un aumento de más del 22% respecto al año anterior, y consolidándose como una de las tecnologías renovables de mayor expansión en el mundo.

Este crecimiento ha sido respaldado por políticas gubernamentales, incentivos económicos y una creciente conciencia ambiental por parte de la sociedad. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos que han permitido mejorar la eficiencia y reducir los costos de los paneles solares, persisten barreras importantes para su adopción masiva, especialmente en entornos rurales, académicos y de pequeños negocios.

Una de estas barreras es la falta de herramientas accesibles para evaluar el rendimiento real de los sistemas fotovoltaicos instalados, lo cual es crucial para garantizar su óptimo funcionamiento y prolongar su vida útil. Diversos estudios, como el de Mendoza et al. (2021), han señalado que en América Latina el 75% de las escuelas rurales con sistemas solares instalados no cuentan con personal capacitado ni equipos adecuados para monitorear su eficiencia, lo que conduce a fallas no detectadas y pérdidas de inversión.

Tradicionalmente, la evaluación de la eficiencia de los paneles solares se ha realizado mediante equipos de alto costo y procedimientos técnicos complejos, generalmente disponibles solo para grandes proyectos o instituciones con recursos significativos. Esta situación limita la capacidad de usuarios con presupuestos reducidos para monitorear, mantener y optimizar sus instalaciones, desaprovechando el potencial energético de los sistemas solares que poseen.

Por ejemplo, una cooperativa agrícola en Chalatenango con un sistema solar de 3 kW reportó una caída del 30% en generación mensual debido a sombreado parcial y acumulación de

polvo, problemas que no pudieron ser identificados a tiempo por falta de instrumentos de medición. De igual manera, en una escuela rural de Ahuachapán, el sistema solar dejó de funcionar correctamente durante meses debido a una falla en un módulo, sin que nadie pudiera detectarlo hasta que intervinieron técnicos externos, lo que implicó un gasto adicional y pérdida de clases con iluminación deficiente.

Estas limitaciones técnicas y económicas reafirman la necesidad de metodologías de evaluación que sean económicamente viables, técnicamente simples y adaptables a los entornos reales donde se utilizan los paneles solares.

1.2 Formulación del problema.

¿Cómo diseñar una metodología accesible y económica que permita medir de manera precisa la eficiencia y el rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos en condiciones reales de operación, utilizando instrumentos de bajo costo y procedimientos sencillos, para fomentar su uso en comunidades, pequeñas empresas e instituciones educativas con recursos limitados?

1.3 Descripción del problema.

La evaluación precisa del rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos se ha vuelto un requerimiento técnico fundamental ante la creciente adopción de estas tecnologías en aplicaciones residenciales, industriales, comerciales y en la conexión de redes de distribución eléctrica. Los sistemas solares representan una alternativa clave para reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables, mitigar el impacto ambiental y promover la sostenibilidad energética. Sin embargo, realizar mediciones exactas de la eficiencia y el rendimiento de los paneles solares en condiciones reales de operación plantea diversas barreras técnicas y económicas, que dificultan su aplicación en contextos con recursos limitados.

Problemática Técnica:

- Instrumentos costosos y especializados: La evaluación precisa del rendimiento de paneles solares requiere dispositivos como trazadores de curvas I-V y analizadores

de potencia, cuyo costo oscila entre \$6,000 y \$16,000 USD. Esta inversión es difícil de asumir para instituciones académicas, pequeños negocios o comunidades que buscan soluciones asequibles, ya que estos equipos están diseñados principalmente para usuarios con altos recursos.

- **Requerimientos técnicos avanzados:** El uso de estos instrumentos demanda conocimientos especializados para configurar, interpretar y analizar datos, lo que limita su adopción en contextos donde no se dispone de personal capacitado.
- **Condiciones reales de operación:** A diferencia de los entornos controlados de laboratorio, los sistemas fotovoltaicos operan en condiciones afectadas por variables como la irradiancia solar, la temperatura ambiente, y la acumulación de suciedad o sombras parciales. Estas variables impactan directamente en la eficiencia, haciendo necesaria una metodología que se adapte a esas realidades.
- **Limitaciones en tecnologías emergentes:** Sistemas como los híbridos PV-T o termoelectricos ofrecen mayor eficiencia combinada, pero sus elevados costos los vuelven inviables para aplicaciones comunitarias o educativas. La falta de opciones intermedias asequibles genera una brecha técnica en proyectos de bajo presupuesto.

Problemática Económica

- **Alta inversión inicial:** Las tecnologías y herramientas actualmente disponibles representan costos prohibitivos para iniciativas a pequeña escala o académicas, restringiendo la expansión de la energía solar en zonas con alto potencial.
- **Gastos recurrentes en monitoreo:** Además del desembolso inicial, el monitoreo continuo exige mantenimiento, calibración de equipos y contratación de personal técnico, lo que incrementa los costos operativos a largo plazo.
- **Ausencia de alternativas accesibles:** Actualmente no existen herramientas de bajo costo que ofrezcan facilidad de uso, precisión aceptable y disponibilidad en mercados

locales. Esto limita la capacidad de monitoreo en comunidades rurales, microempresas y centros educativos con recursos limitados.

Necesidad Identificada

Estas limitaciones evidencian la necesidad de diseñar una metodología económica, accesible y técnicamente viable que permita evaluar de manera precisa el rendimiento de paneles solares en condiciones reales. Esta debe:

- Reducir los costos de monitoreo mediante instrumentos básicos.
- Ser comprensible para usuarios con conocimientos técnicos limitados.
- Adaptarse a las condiciones reales de operación para reflejar con fidelidad el comportamiento del sistema.

1.4 Importancia de la investigación.

La resolución de esta problemática no solo contribuirá a democratizar el acceso a tecnologías solares, sino que también:

- Mejorará la capacidad de los usuarios para diagnosticar y optimizar sus sistemas solares, aumentando su vida útil y rendimiento.
- Promoverá la investigación y educación en energía solar a nivel académico y comunitario, fomentando la innovación y el uso masivo de estas tecnologías.
- Contribuirá al cumplimiento de objetivos globales de sostenibilidad, como los establecidos en los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) de las Naciones Unidas, en particular en lo relativo a energía asequible y no contaminante.

1.5 Justificación.

El acceso a herramientas y metodologías para evaluar el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos continúa siendo limitado en contextos de escasos recursos, a pesar del auge global de las energías renovables. La presente investigación responde a la necesidad de desarrollar una solución técnica y económica que facilite la medición precisa de la eficiencia

de estos sistemas en condiciones reales de operación, superando así barreras técnicas, económicas y sociales que han obstaculizado su adopción masiva.

Desde una perspectiva técnica, los métodos actuales de evaluación dependen de equipos costosos como trazadores de curvas I-V y analizadores especializados, los cuales requieren conocimientos avanzados para su uso. Esto limita su aplicación en comunidades, microempresas o instituciones educativas donde no siempre se dispone de personal capacitado ni de recursos suficientes. Por ello, se propone una metodología basada en instrumentos de bajo costo —como multímetros, medidores de irradiancia y probadores MPPT simples— que permita obtener datos confiables sobre parámetros clave como la potencia máxima (P_{max}), eficiencia y curva característica I-V.

En el ámbito económico, esta propuesta promueve soluciones viables para proyectos de pequeña escala, permitiendo optimizar la inversión inicial, reducir los costos operativos de monitoreo y extender la vida útil de los paneles mediante un mantenimiento informado. Esta accesibilidad tecnológica no solo democratiza el uso de sistemas fotovoltaicos, sino que también fomenta su sostenibilidad en el tiempo.

El impacto social y educativo es igualmente relevante. La incorporación de esta metodología en entornos académicos y comunitarios facilitará procesos de enseñanza-aprendizaje en energías renovables mediante experiencias prácticas. Además, empodera a estudiantes, técnicos y emprendedores locales al dotarlos de herramientas para evaluar y mantener sus propios sistemas, promoviendo una cultura técnica descentralizada.

Por último, desde el enfoque ambiental, el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima). Al facilitar la adopción de tecnologías limpias mediante instrumentos accesibles, se promueve la eficiencia energética, se reduce la huella de carbono y se contribuye a mitigar los efectos del cambio climático.

Tabla 1:

Beneficios esperados de la metodología propuesta por área de impacto

Área de Impacto	Beneficio Principal
Técnica	Evaluación eficiente con equipos accesibles, adecuados para condiciones reales.
Económica	Reducción de costos de implementación, monitoreo y mantenimiento.
Social y Educativa	Inclusión de comunidades y formación técnica en energías renovables.
Ambiental y Sostenible	Contribución al ODS 7 y 13 mediante uso eficiente de energía solar y baja emisión.

Nota: La tabla muestra los beneficios esperados de la metodología propuesta por área de impacto.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Implementar y validar una metodología económica y accesible para medir la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos en condiciones reales de operación, utilizando instrumentos de bajo costo.

1.6.2 Objetivos específicos

1. **Identificar los parámetros críticos que afectan el rendimiento de paneles solares** en condiciones reales, incluyendo variables eléctricas y ambientales como irradiancia, temperatura y suciedad.
2. **Diseñar un protocolo de medición práctico**, basado en el uso de instrumentos accesibles, que permita evaluar de forma fiable la curva I-V y la potencia máxima de los módulos solares.
3. **Validar experimentalmente la metodología propuesta** mediante pruebas bajo diferentes escenarios climáticos y tipos de paneles (monocristalinos y policristalinos).

4. **Evaluar el impacto de condiciones ambientales sobre la eficiencia fotovoltaica**, comparando el comportamiento de los paneles ante factores externos como radiación variable, sombras y temperatura.
5. **Proporcionar recomendaciones de aplicación de la metodología en distintos contextos**, como instalaciones residenciales, educativas o rurales, promoviendo el uso de tecnologías renovables con recursos limitados.

1.7 Alcance.

Este estudio se enfoca en el diseño, desarrollo y validación de una metodología práctica para evaluar la eficiencia y el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos de pequeña y mediana escala. La investigación contempla únicamente pruebas realizadas en condiciones reales de operación, utilizando equipos de medición accesibles y de bajo costo. Los resultados obtenidos están dirigidos a usuarios residenciales, emprendedores, técnicos locales y comunidades que deseen optimizar sus instalaciones solares con recursos limitados, promoviendo así la adopción de tecnologías renovables mediante herramientas técnicas de bajo costo y fácil implementación.

1.8 Limitantes del problema.

El desarrollo del presente proyecto enfrenta ciertas limitaciones que deben considerarse al interpretar sus resultados. En primer lugar, no se incluye el análisis de grandes plantas solares industriales, ya que el enfoque está dirigido a sistemas fotovoltaicos de pequeña y mediana escala. Asimismo, los instrumentos económicos propuestos, aunque accesibles y funcionales, pueden presentar márgenes de error superiores en comparación con equipos profesionales de alta gama, lo que podría afectar la precisión de las mediciones. Por otro lado, las condiciones ambientales variables como la nubosidad, la acumulación de polvo o las fluctuaciones estacionales de la irradiancia pueden influir significativamente en la evaluación del rendimiento fotovoltaico en campo y generar variabilidad en los resultados.

1.9 Delimitación del problema.

La investigación se llevará a cabo considerando las siguientes delimitaciones:

- Ubicación: Las pruebas de campo se realizarán en ubicaciones accesibles que representen condiciones típicas de instalaciones residenciales y comunitarias.
- Tipos de paneles evaluados: Se trabajará principalmente con paneles solares monocristalinos y policristalinos, por ser los más comúnmente utilizados en proyectos de pequeña escala.
- Instrumentos de medición: Se utilizarán dispositivos económicos como multímetros digitales, medidores de irradiancia básicos y probadores MPPT de bajo costo.
- Aplicaciones: La metodología estará orientada a usuarios finales sin experiencia técnica avanzada, tales como estudiantes, pequeños emprendedores y técnicos comunitarios.

CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA.

2.1 Marco histórico.

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica tiene sus raíces en la década de 1950, cuando se utilizó inicialmente en proyectos espaciales. Durante esta época, la prioridad era desarrollar sistemas que pudieran generar energía en condiciones extremas y con alta confiabilidad. Los paneles solares fueron esenciales para alimentar satélites y estaciones espaciales, dado su capacidad para convertir directamente la energía solar en electricidad, sin necesidad de combustibles ni partes móviles.

Primera generación de paneles solares:

- Los primeros paneles solares utilizaban celdas de silicio monocristalino, con eficiencias del orden del 6% al 10%. Su costo extremadamente alto limitó su uso exclusivamente a aplicaciones aeroespaciales y militares.
- En 1954, Bell Laboratories introdujo la primera célula solar de silicio, un avance que marcó el inicio de la era moderna de la tecnología fotovoltaica.

Expansión hacia aplicaciones terrestres:

- Durante las décadas de 1970 y 1980, la crisis energética mundial despertó el interés en fuentes alternativas de energía. Esto impulsó la investigación y desarrollo de paneles solares para aplicaciones terrestres.
- En esta época, se introdujeron los paneles policristalinos, que, aunque menos eficientes que los monocristalinos, eran más económicos de fabricar. Esto permitió un aumento en la producción y comercialización de paneles solares.

Avances tecnológicos en las últimas dos décadas:

- Materiales semiconductores: El uso de materiales avanzados como películas delgadas de telurio de cadmio (CdTe) y diseleniuro de cobre-indio-galio (CIGS) ha diversificado las opciones de tecnología fotovoltaica. Aunque menos eficientes que las celdas de silicio, estos materiales son más económicos y adecuados para ciertas aplicaciones.
- Eficiencia y reducción de costos: Desde el año 2000, la eficiencia promedio de los paneles solares comerciales ha aumentado significativamente, llegando a valores

superiores al 20% en paneles monocristalinos de alta gama. Al mismo tiempo, los costos de producción han disminuido debido a:

- Escala de producción masiva.
 - Mejoras en los procesos de fabricación, como la técnica de “Czochralski” para la producción de silicio.
 - Uso de automatización en las líneas de montaje.
- Según datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), el costo promedio de la energía fotovoltaica ha disminuido en más del 80% desde 2010, haciendo la tecnología más competitiva frente a fuentes de energía convencionales.

Herramientas para medir rendimiento:

A pesar de los avances en la fabricación de paneles solares, las herramientas y métodos para medir su rendimiento en condiciones reales de operación no han experimentado el mismo grado de accesibilidad económica. Los trazadores de curvas I-V y analizadores de rendimiento permanecen fuera del alcance de muchas pequeñas empresas y comunidades debido a:

- Su alto costo inicial.
- Complejidad técnica para su uso e interpretación de datos.
- Enfoque limitado a aplicaciones profesionales y de investigación avanzada.

Desafíos actuales en medición de rendimiento:

- La industria se enfrenta al desafío de adaptar tecnologías de medición a contextos más amplios, como aplicaciones comunitarias, académicas y residenciales. A pesar de la creciente adopción de paneles solares, la brecha tecnológica en el acceso a herramientas de monitoreo y análisis dificulta la optimización de sistemas fotovoltaicos a nivel local.

Relevancia histórica del proyecto:

Este proyecto busca abordar este vacío al desarrollar una metodología económica y accesible que permita medir y analizar el rendimiento de paneles solares en campo. Al seguir el camino trazado por la evolución tecnológica de los paneles solares, el proyecto tiene el potencial de contribuir a una nueva etapa de democratización en el uso y evaluación de tecnologías fotovoltaicas, alineándose con el propósito histórico de hacer la energía solar más inclusiva y sostenible.

2.1.1 Evidencia comparativa reciente sobre tecnologías fotovoltaicas

El análisis de las diferencias de rendimiento entre tecnologías fotovoltaicas, particularmente entre paneles monocristalinos y policristalinos, ha cobrado creciente importancia ante el aumento de la demanda de soluciones eficientes, accesibles y adaptables a diferentes condiciones climáticas. En este contexto, investigaciones recientes respaldan empíricamente la superioridad técnica de los módulos monocristalinos bajo condiciones de irradiancia elevada y climas cálidos, escenario característico de muchos países tropicales como El Salvador.

Un estudio experimental conducido por Ayadi et al. (2022) comparó el comportamiento de sistemas solares monocristalinos, policristalinos y de película delgada a lo largo de seis años en condiciones de alta radiación solar. Los resultados mostraron que los paneles monocristalinos presentaron un rendimiento energético superior de manera constante, destacando su capacidad para mantener niveles más estables de eficiencia frente a las variaciones climáticas diarias. Esta evidencia empírica respalda la elección de esta tecnología como referencia principal en el presente trabajo de graduación, al evidenciar una mayor densidad de potencia y eficiencia energética en condiciones similares a las salvadoreñas.

En línea con este hallazgo, Benganem et al. (2023) realizaron una evaluación comparativa entre módulos monocristalinos y policristalinos en una región caracterizada por temperaturas elevadas y baja humedad relativa. El estudio confirmó que los módulos monocristalinos conservan un mejor comportamiento térmico, con menores pérdidas de eficiencia al aumentar la temperatura ambiente, fenómeno común en sistemas fotovoltaicos instalados en entornos

tropicales. Dado que las condiciones evaluadas por los autores se asemejan a las que prevalecen en El Salvador, estos resultados fortalecen la validez externa de las pruebas experimentales realizadas en el presente trabajo.

Asimismo, la International Electrotechnical Commission (IEC) ha establecido en su norma técnica IEC 61215-2:2021 procedimientos estandarizados para la evaluación del desempeño de módulos fotovoltaicos bajo condiciones controladas, con el fin de garantizar la comparabilidad entre tecnologías. Esta normativa, adoptada globalmente, ha demostrado que los paneles monocristalinos presentan, en promedio, una mayor densidad de potencia (W/m^2) y una menor degradación frente a condiciones de estrés térmico o irradiancia variable, atributos corroborados por las mediciones en campo realizadas como parte de esta investigación.

Por su parte, la International Energy Agency (IEA), a través de su programa especializado en sistemas de energía solar (IEA-PVPS), ha publicado informes técnicos que evidencian cómo las distintas tecnologías fotovoltaicas responden ante escenarios climáticos reales. En el documento IEA-PVPS T13-20:2020, se indica que los módulos monocristalinos tienden a mantener su rendimiento incluso en situaciones de irradiancia intermitente y temperaturas extremas, mientras que los policristalinos presentan una pérdida más acentuada de eficiencia. Esta diferencia de comportamiento frente a factores ambientales resulta clave para determinar la idoneidad tecnológica según el contexto geográfico y económico del proyecto.

En resumen, la evidencia científica actual apoya la adopción de tecnologías monocristalinas en regiones como El Salvador, donde las condiciones de alta irradiancia y temperatura demandan módulos con un desempeño térmico robusto. Las investigaciones revisadas y las normas técnicas internacionales brindan una base sólida para sustentar tanto la elección metodológica como la interpretación de los resultados obtenidos en este trabajo de graduación.

2.2 Marco teórico.

El marco teórico de este proyecto se sustenta en principios fundamentales de la energía fotovoltaica y conceptos técnicos esenciales para el diseño, desarrollo y validación de metodologías para evaluar el rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos. A continuación, se describen los conceptos clave y su relevancia técnica:

Efecto Fotovoltaico

- **Definición:** El efecto fotovoltaico es el fenómeno físico mediante el cual ciertos materiales semiconductores, como el silicio, generan una corriente eléctrica cuando se exponen a la radiación solar. Fue descubierto por primera vez por Alexandre Edmond Becquerel en 1839.
- **Principio de funcionamiento:**
 - Los fotones de la luz solar impactan en el material semiconductor, transfiriendo su energía a los electrones en la banda de valencia.
 - Los electrones ganan suficiente energía para pasar a la banda de conducción, dejando vacantes llamadas huecos en la banda de valencia.
 - La unión p-n en las celdas solares crea un campo eléctrico interno que separa los electrones y huecos, generando una corriente eléctrica cuando el circuito está cerrado.
- **Importancia técnica:** El efecto fotovoltaico es la base de todos los sistemas solares fotovoltaicos, y su eficiencia depende de factores como la calidad del material semiconductor, la estructura de la celda y las condiciones ambientales.

Curva Característica I-V

- **Definición:** La curva I-V es una representación gráfica de la relación entre la corriente (A) y la Tensión (V) generados por un panel solar bajo condiciones específicas de irradiancia y temperatura.
- **Características clave:**

- En el eje vertical se representa la corriente (A), mientras que en el eje horizontal se representa la Tensión (V).
 - El punto de intersección con el eje de corriente indica la corriente de cortocircuito I_{sc} , expresada en amperios (A), mientras que el punto de intersección con el eje de tensión señala la tensión en circuito abierto V_{oc} , expresada en voltios (V).
 - La curva presenta un punto donde la potencia eléctrica ($P = V \times I$) alcanza su valor máximo, conocido como el punto de máxima potencia (MPP), el cual se mide en vatios (W).
- Relevancia técnica: La forma de la curva I-V proporciona información crucial sobre el rendimiento del panel y permite diagnosticar problemas como fallos en las celdas, sombras parciales o pérdidas por resistencia.

Punto de Máxima Potencia (MPPT)

- Definición: El punto de máxima potencia (MPP) es el punto en la curva I-V donde el producto de la tensión (V) y la corriente (A) es máximo, es decir, donde el panel genera su potencia óptima.
- Controladores MPPT:
 - Los controladores de carga solar MPPT ajustan continuamente la tensión (V) de salida del panel para operar en el MPP, maximizando la eficiencia de transferencia de energía al sistema de carga o batería.
 - La técnica MPPT utiliza algoritmos para encontrar y mantener el MPP bajo condiciones cambiantes de irradiancia y temperatura.
- Importancia técnica: El MPP varía dependiendo de las condiciones ambientales, por lo que identificar y operar en este punto es fundamental para maximizar la eficiencia del sistema.

Eficiencia de Conversión

- Definición: La eficiencia de un panel solar es el porcentaje de la energía solar incidente que se convierte en energía eléctrica utilizable.
- Cálculo: La eficiencia η se calcula como:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot A} \times 100$$

- Donde:
 - Pmax: Potencia máxima generada por el panel (W).
 - E: Irradiancia solar incidente (W/m²).
 - A: Área del panel (m²).
- Factores que afectan la eficiencia:
 - Temperatura: A medida que la temperatura del panel aumenta, su eficiencia disminuye debido a la reducción de la tensión.
 - Calidad del material: Los defectos en el material semiconductor o en la fabricación de las celdas reducen la eficiencia.
 - Pérdidas ópticas y eléctricas: Incluyen reflexión, sombreado y resistencia interna del panel.

Otros Conceptos Relevantes

- Resistencia Interna del Panel:
 - Se divide en resistencia en serie Rs) y resistencia en paralelo Rp.
 - La Rs afecta negativamente la corriente máxima, mientras que la Rp está relacionada con fugas de corriente dentro del panel.
- Factor de Llenado (FF):
 - Representa la calidad del panel y se calcula como:

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

- Un FF alto indica un panel de buena calidad, con pocas pérdidas internas.

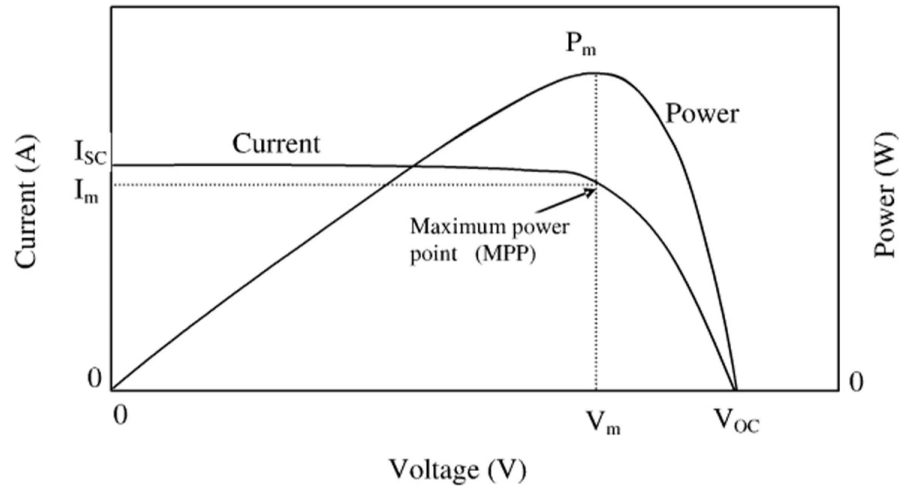
- Condiciones estándar de prueba (STC):
 - Para comparar paneles solares, se utilizan condiciones estándar (STC), que incluyen irradiancia de 1000 W/m^2 , temperatura de celda de 25°C y un espectro solar AM1.5.

Importancia del Marco Teórico en el Proyecto

- Estos conceptos teóricos son fundamentales para diseñar la metodología económica que permita evaluar el rendimiento de los paneles solares en condiciones reales.
- La comprensión técnica de la curva I-V, el MPP y la eficiencia permite establecer parámetros de medición confiables utilizando instrumentos accesibles, contribuyendo a la validación de la metodología propuesta.

Figura 1:

Gráficas de corriente, potencia y tensión de una celda fotovoltaica



Nota. Se representan las curvas de corriente y potencia frente a tensión (V), identificando el punto de máxima potencia bajo condiciones reales de irradiancia.

2.3 Marco conceptual.

A continuación, se presentan definiciones clave que permiten comprender con claridad los términos utilizados en este estudio, en correspondencia con los conceptos técnicos desarrollados previamente en el marco teórico.

2.3.1 Eficiencia Energética

La eficiencia energética de un panel solar es el porcentaje de la energía solar incidente que es convertida en energía eléctrica utilizable. Es un indicador clave del rendimiento de un módulo fotovoltaico y depende de factores como la irradiancia, el área activa del panel y la potencia máxima generada.

2.3.2 Punto de Máxima Potencia (MPPT)

Es el punto en la curva I-V donde el producto de la corriente y la tensión alcanza su valor máximo. Representa el estado ideal de operación del panel solar.

2.3.3 Curva I-V

Gráfico que describe la relación entre corriente y tensión en un panel solar bajo diferentes condiciones de carga. Permite analizar el comportamiento eléctrico y estimar el rendimiento del módulo.

2.4 Marco legal.

El marco legal para este estudio abarca las normativas y estándares internacionales, así como las regulaciones locales relacionadas con la instalación, operación, medición y seguridad de los sistemas fotovoltaicos.

Estas disposiciones establecen los lineamientos técnicos, ambientales y operativos para garantizar el uso eficiente y seguro de la energía solar, promoviendo su adopción en un marco de sostenibilidad y cumplimiento legal.

Normativas Internacionales

IEC 61724 (Monitoreo de Desempeño de Sistemas Fotovoltaicos):

Descripción: Este estándar, desarrollado por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), establece los requisitos para el monitoreo, evaluación y reporte del rendimiento de sistemas fotovoltaicos. Se enfoca en:

1. Procedimientos de medición de parámetros clave como potencia, eficiencia y degradación.
2. Métodos para registrar y analizar datos ambientales, como irradiancia y temperatura.
3. Reporte de fallas o problemas operativos.
4. Importancia: Proporciona un marco uniforme para evaluar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, permitiendo comparaciones globales y promoviendo la transparencia en el desempeño energético.

IEC 61215 (Calidad de Módulos Fotovoltaicos):

1. Descripción: Especifica los requisitos de diseño y fabricación de módulos solares fotovoltaicos para asegurar su confiabilidad y durabilidad bajo diferentes condiciones ambientales. Incluye pruebas de resistencia al envejecimiento, humedad, ciclos térmicos y exposición a radiación solar.
2. Impacto: Garantiza que los módulos solares utilizados en el estudio cumplan con estándares mínimos de calidad y desempeño.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

La metodología empleada sigue un enfoque experimental que permite evaluar, analizar y comparar el desempeño de paneles solares en condiciones reales de operación.

Este enfoque asegura la recolección de datos confiables para determinar la eficiencia y rendimiento de los paneles solares monocristalinos y policristalinos, utilizando equipos accesibles y métodos replicables.

Los instrumentos seleccionados (SM206, EL400B y DL24) se eligieron por su equilibrio entre costo accesible, portabilidad y precisión aceptable, permitiendo la ejecución de pruebas experimentales en campo sin recurrir a laboratorios especializados. Cada equipo cumple una función específica: el SM206 cuantifica la irradiancia solar incidente, el EL400B obtiene los parámetros eléctricos principales del panel (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} y P_{max}) y el DL24 permite trazar curvas I-V y P-V aplicando cargas programables. Esta combinación hace posible caracterizar el rendimiento real de los paneles solares con equipos económicos, replicables y acordes con el objetivo metodológico del trabajo.

3.1 Identificación de los paneles solares a evaluar (monocristalinos y policristalinos).

1. Descripción técnica: Se seleccionarán paneles solares monocristalinos y policristalinos con características técnicas similares (por ejemplo, potencia nominal de 50W cada uno).
2. Razón de la selección: La comparación entre estas dos tecnologías es esencial para determinar cuál presenta un mejor desempeño bajo condiciones específicas de irradiancia, temperatura y sombra parcial.
3. Parámetros iniciales por registrar: Dimensiones físicas y área efectiva del panel.
4. Especificaciones técnicas del fabricante: V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} e I_{mp} en condiciones estándar (STC).

3.2 Medición de irradiancia solar y temperatura ambiental utilizando el medidor SM206.

1. Herramienta utilizada: Medidor SM206 (Solar Power Meter):
2. Este dispositivo mide la irradiancia solar incidente en W/m^2 en tiempo real, fundamental para calcular la eficiencia de los paneles.

3. Procedimiento:

Realizar mediciones en intervalos regulares durante el experimento para capturar variaciones climáticas.

Registrar los valores de irradiancia y temperatura junto con las mediciones eléctricas, correlacionando las condiciones ambientales con el rendimiento del panel.

Importancia técnica: Estas mediciones aseguran que los datos recolectados sean ajustados a las condiciones reales, lo que permite aplicar correcciones cuando sea necesario, especialmente en días con fluctuaciones rápidas de irradiancia.

3.3 Evaluación de parámetros eléctricos (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp})

1. Herramienta utilizada: Solar Panel Tester 400W:

Este equipo permite medir directamente los parámetros clave de los paneles solares, como:

2. V_{oc} (Tensión en Circuito Abierto) [V]: Máxima tensión del panel cuando no hay carga.
3. I_{sc} (Corriente de Cortocircuito) [A]: Máxima corriente generada cuando la tensión es cero.
4. V_{mp} (Tensión en el Punto de Máxima Potencia) [V]: Tensión donde se alcanza la máxima potencia.
5. I_{mp} (Corriente en el Punto de Máxima Potencia) [A]: Corriente correspondiente al punto de máxima potencia.

6. Procedimiento:

Conectar el Solar Panel Tester directamente al panel bajo condiciones de operación. Registrar múltiples lecturas en diferentes momentos del día para evaluar la estabilidad y comportamiento del panel.

Importancia técnica: Estos parámetros son fundamentales para trazar la curva I-V y calcular la potencia máxima generada.

La elección de los rangos de medición y de los equipos utilizados responde a criterios técnicos, metodológicos y prácticos alineados con los objetivos del trabajo.

Este trabajo de graduación, tanto en su fase teórica como práctica, ha sido financiado personalmente sin patrocinio institucional o empresarial. Por tanto, se buscó desarrollar y demostrar una metodología económica y replicable sin necesidad de equipos de laboratorio de alto costo.

Se utilizaron paneles solares fotovoltaicos de 50 W de potencia nominal porque se logró conseguir en el mercado local de El Salvador ambos tipos de tecnología (monocristalino y policristalino) con la misma potencia. Esta igualdad de potencia fue esencial para asegurar la comparación bajo condiciones equivalentes. La disponibilidad en el mercado limitó la potencia seleccionada, ya que paneles de igual capacidad en ambas tecnologías son poco comunes.

- Los valores eléctricos de tensión y corriente (V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp} y P_{max}) para estos paneles están definidos de fábrica, de manera que el rango de mediciones a utilizar se estableció en función de estas especificaciones.
- El uso de paneles de 50 W demuestra que la metodología es aplicable sin necesidad de paneles de alta potencia (de 250 a 500 W) y que los resultados son comparables en cuanto a forma y conclusiones, cumpliendo el objetivo principal del estudio: comprobar que una metodología alterna, más costo efectivo, puede generar resultados similares a los de un trazador de curvas I V profesional de alto costo.
- Los equipos seleccionados (SM206, EL400B y DL24P) permiten medir irradiancia, parámetros eléctricos principales y curvas I V en campo. Para garantizar condiciones similares a las de pruebas normalizadas (STC), se buscó trabajar con irradiancias cercanas a 900 1000 W/m², dentro de los límites que las condiciones climáticas reales permiten.
- La carga electrónica DL24P tiene una capacidad máxima de 180 W, lo cual es más que suficiente para evaluar paneles fotovoltaicos de 50 W y aún tendría margen para paneles de mayor potencia en trabajos similares.
- El multímetro solar EL400B admite paneles de hasta 400 W, por lo que también resulta idóneo para los niveles de potencia manejados en este estudio.

- La adquisición de equipamiento de rangos superiores hubiera implicado un incremento considerable de costo y, al trabajar muy por debajo de su rango ideal, una menor exactitud y precisión en los datos.
- Finalmente, los equipos y paneles empleados en este estudio serán donados al laboratorio de Electrónica de la universidad, de modo que puedan seguir siendo aprovechados por otros estudiantes para ejercicios prácticos y proyectos similares.

En síntesis, el rango de mediciones responde a una combinación de: recursos disponibles, condiciones reales de mercado, parámetros definidos por los fabricantes de los paneles, capacidad nominal de los instrumentos seleccionados y el objetivo central de demostrar que una metodología de bajo costo puede ofrecer resultados confiables sin necesidad de equipos de laboratorio de alta gama.

3.4 Análisis de la curva I-V

- Herramienta utilizada: MakerHawk Battery Load Tester (Cargas electrónica variable):

Este dispositivo simula diferentes niveles de carga eléctrica al panel, permitiendo obtener múltiples puntos de datos en la curva I-V.

Las cargas variables reproducen las condiciones de funcionamiento real al variar el tensión y corriente del sistema.

- Procedimiento:

Conectar el panel al tester bajo diferentes condiciones de carga.

Registrar los valores de corriente y tensión para trazar la curva característica I-V del panel.

Identificar visualmente el Punto de Máxima Potencia (MPP) en la curva.

- Importancia técnica:

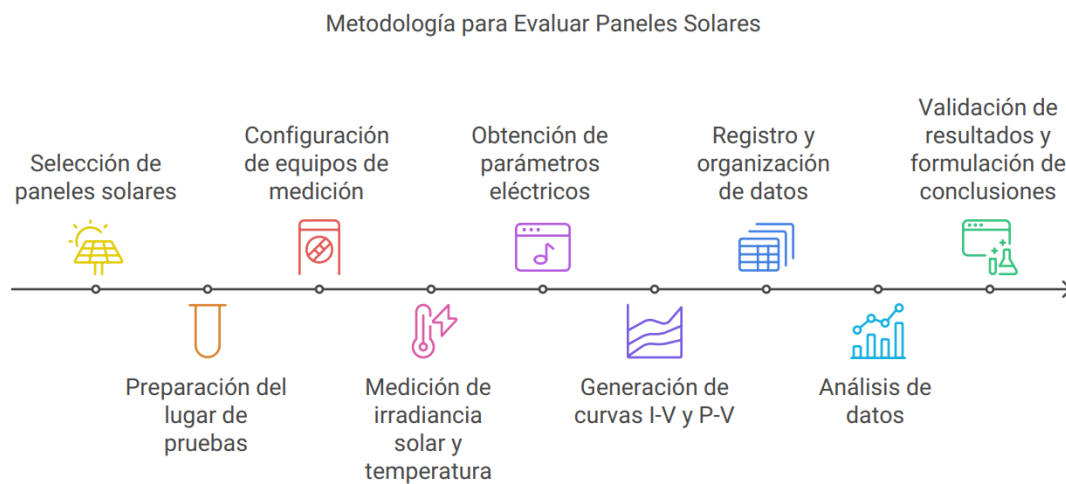
La curva I-V es un diagnóstico integral del desempeño del panel. Permite evaluar la eficiencia y calidad del panel, así como identificar posibles defectos o limitaciones, como pérdidas por resistencia interna o sombreados.

3.5 Análisis de Datos

- Los datos recolectados serán procesados para:
 - Calcular la eficiencia del panel
 - Comparar los resultados entre los paneles monocristalinos y policristalinos.
 - Evaluar el impacto de las condiciones ambientales en los parámetros clave.

Figura 2:

Metodología para evaluar paneles solares



Nota. Diagrama de las etapas aplicadas para comparar tecnologías fotovoltaicas bajo condiciones operativas reales.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

4.1 Instrumentación utilizada

Para la obtención de los datos experimentales, se empleó la siguiente instrumentación de bajo costo, pero con precisión aceptable:

4.1.1 Medidor de irradiancia SM206

El "Solar Power Meter SM206" es un instrumento preciso diseñado para medir la intensidad de la radiación solar, aplicable en investigaciones solares, experimentos físicos y ópticos, meteorología y agricultura.

1. Descripción General

El medidor de potencia solar SM206 es un instrumento de precisión que permite medir la intensidad de la luz solar. Puede ser utilizado tanto para investigaciones solares como para verificar la transmisión de luz a través de superficies como ventanas de vehículos.

Figura 3:

Medidor de irradiancia SM206-SOLAR



Nota. Instrumento usado para registrar la irradiancia solar durante los ensayos de campo, expresada en W/m^2 .

2. Características

- Unidades seleccionables: El dispositivo permite medir en dos unidades: W/m^2 y $\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$.

- Pantalla digital: Cuenta con una pantalla de 4½ dígitos, capaz de mostrar valores máximos de hasta 19999.
- Función de retención de datos: Se puede mantener la lectura fija en la pantalla para facilitar la lectura.
- Rango de medición amplio: No requiere ajuste, abarcando un rango de 0.1 a 1999.9 W/m² o Btu/(ft²·h).

3. Especificaciones Técnicas

- Resolución: 0.1 W/m² o 0.1 Btu/(ft²·h).
- Precisión del instrumento: $\pm(10\% \text{ del valor medido} + 2 \text{ dígitos})$.
- Error por temperatura: $\pm 0.38 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ o $\pm 0.12 \text{ Btu/(ft}^2\cdot\text{h)/°C}$, con desviación a 25°C.
- Deriva anual: $< \pm 1.5\%$.
- Rango de longitud de onda: 340-1100 nm, con un ángulo de incidencia de ± 45 grados y una longitud de onda máxima de 900 nm.
- Tiempo de muestreo: 2.5 muestras por segundo.
- Temperatura de operación: 0°C a 40°C, con una humedad inferior al 80% HR.
- Temperatura de almacenamiento: -10°C a 50°C, con una humedad inferior al 70% HR.
- Dimensiones y peso: 132 mm de largo, 60 mm de ancho y 38 mm de alto, con un peso aproximado de 150 g.
- Alimentación: Batería de 9V tipo 6F22, con una duración aproximada de 100 horas.

4. Descripción de los Componentes

- Pantalla: Muestra los datos, las unidades de medida (W/m² o Btu/(ft²·h)), y tiene un símbolo de batería baja para indicar cuándo debe reemplazarse.
- Teclado:
 - Ventana fotosensible para medir la intensidad.
 - Pantalla LCD.
 - Botón de encendido/apagado.
 - Botón para seleccionar las unidades de medida.
 - Botón "HOLD" para la retención de datos.

5. Operación del Aparato

1. Encendido: Insertar la batería correctamente y presiona el botón de encendido para activar el dispositivo. La pantalla mostrará "00.0" inicialmente, y la unidad predeterminada es W/m^2 .
2. Selección de Unidad: Cambiar entre W/m^2 y $Btu/(ft^2 \cdot h)$ presionando el botón "W/B".
3. Medición: Cubrir la ventana fotosensible con la mano para verificar que el dispositivo funcione correctamente (debería mostrar "000.0" o "000.1"). Luego, proceder a realizar la medición.
4. Retención de Datos: Presionar "HOLD" durante la medición para mantener el valor mostrado en la pantalla. Presionar de nuevo para salir de esta función.
5. Apagado: Presionar el botón de encendido/apagado después de la medición para apagar el dispositivo.

6. Reemplazo de la Batería

Cuando aparezca el símbolo de batería baja en la pantalla, reemplazar la batería de 9V. Si no se reemplaza a tiempo, la precisión del medidor puede verse afectada. Se recomienda retirar la batería si no se va a utilizar el medidor durante un periodo prolongado, para evitar daños por fugas.

7. Precauciones

- Instrumento de Precisión: Almacenar en el estuche proporcionado y evitar lugares húmedos.
- Cuidado de la Ventana Fotosensible: Mantener la ventana fotosensible limpia y evitar que se raye o se ensucie. No limpiar el dispositivo con líquidos ni sumergirlo en agua.

8. Aplicaciones

Este medidor es útil para:

- Investigación Solar: Medición de la radiación solar para estudios energéticos y ambientales.
- Experimentos Físicos y Ópticos: Adecuado para laboratorios que requieren mediciones precisas de la intensidad de la luz.

- Verificación de Propiedades de Vidrio: Medición de la intensidad de la luz a través de ventanas, útil en estudios de eficiencia energética en edificaciones y vehículos.

9. Limitaciones y Consideraciones

- Rango de Medición: Estar limitado a una intensidad máxima de 1999.9 W/m^2 , lo cual puede no ser suficiente en situaciones de radiación solar extremadamente alta.
- Ángulo de Incidencia: Obtener mayor precisión cuando la luz incide perpendicularmente sobre el sensor. Ángulos mayores de ± 45 grados pueden afectar la exactitud de la medición.
- Durabilidad de la Batería: Tener una duración aproximada de 100 horas, lo cual puede ser una limitante si se requieren mediciones continuas durante periodos prolongados.

4.1.2 Multímetro solar EL400B

Uno de los dispositivos fundamentales en la recolección de datos fue el multímetro solar EL400B, un equipo diseñado específicamente para evaluar el comportamiento eléctrico de paneles fotovoltaicos. Este multímetro permite identificar con precisión el punto de máxima potencia (MPPT), registrar la tensión de circuito abierto (Voc) y la corriente en el punto de máxima potencia (Imp) [A], entre otros parámetros clave que permiten calcular la eficiencia real del panel en campo. Su uso fue crucial para el trazado de las curvas I-V y P-V, así como para la obtención de datos eléctricos confiables durante las pruebas experimentales realizadas tanto al panel monocristalino como al policristalino.

Índice

1. Introducción
2. Especificaciones Técnicas
3. Parámetros de Medición
4. Funcionamiento y Operación
 - Detección Automática del MPPT
 - Detección Manual del MPPT
 - Indicaciones de la Pantalla LCD

5. Conexión y Configuración Inicial
6. Procedimientos de Mantenimiento y Seguridad
7. Guía de Resolución de Problemas (Troubleshooting)
8. Contenido del Paquete y Accesorios
9. Advertencias y Precauciones
10. Preguntas Frecuentes (FAQ)

1. Introducción

El multímetro solar EL400B de la marca "Elejoy" es una herramienta especializada para medir el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos, evaluando parámetros clave como el punto de máxima potencia (MPPT), tensión de circuito abierto (Voc), corriente en el punto de máxima potencia (Imp) [A] y potencia máxima (Pmax). Su diseño portátil y facilidad de uso lo hacen ideal para instaladores, usuarios domésticos y entusiastas de la energía solar. Incluye modos de detección automática y manual, que ofrecen flexibilidad en las mediciones.

Figura 4:

Medidor multímetro solar EL400B



Nota. Equipo empleado para obtener parámetros eléctricos clave en módulos fotovoltaicos, como Pmax, Vmp, Imp y Voc.

2. Especificaciones Técnicas

Modelo	EL400B
Rango de Potencia (Power)	5 - 400W
Rango de Tensión (Voltage)	12 - 60V
Rango de Corriente (Current)	0 - 20 ^a
Método de Alimentación	Alimentación por el panel solar
Dimensiones	165 x 80 x 30 mm
Peso	470g
Pantalla	LCD con retroiluminación
Protecciones	Sobrecarga de potencia, sobretensión, sobrecorriente, sobre temperatura, protección contra conexión inversa
Conectividad	Cable MC4 y pinzas tipo cocodrilo

3. Parámetros de Medición

- P_{max} (Potencia Máxima): Medida de la máxima potencia que el panel solar puede entregar en condiciones ideales.
- V_{mp} (Tensión en el Punto de Máxima Potencia): Tensión cuando el panel entrega su potencia máxima.
- I_{mp} (Corriente en el Punto de Máxima Potencia): Corriente correspondiente a la potencia máxima del panel.
- V_{oc} (Tensión de Circuito Abierto): Tensión del panel cuando no hay ninguna carga conectada.

4. Funcionamiento y Operación

El multímetro solar EL400B incluye dos modos de medición para el punto de máxima potencia (MPPT): Automático y Manual.

4.1 Detección Automática del MPPT

- Procedimiento:
 - Presionar el botón de AUTO MPPT.
 - El dispositivo ajusta automáticamente el intervalo de tiempo entre cada medición de acuerdo con la potencia detectada.
- Ejemplos de Intervalos de Refresco:
 - Si la potencia del panel solar es 100W, la pantalla se refrescará cada 5 segundos.
 - Si la potencia es 300W, la pantalla se actualizará cada 15 segundos.
- Uso Sugerido: Ideal para usuarios que quieren un monitoreo continuo sin intervención constante.

4.2 Detección Manual del MPPT

- Procedimiento:
 - Presionar el botón de MANUAL MPPT para comenzar la medición.
 - El dispositivo realizará un escaneo del MPPT y mostrará los resultados.
- Uso Sugerido: Útil para realizar mediciones bajo condiciones específicas o experimentales, permitiendo al usuario controlar el momento de cada lectura.

4.3 Pantalla LCD e Indicaciones

- La pantalla LCD debe mostrar:
 - P_{max} (Potencia máxima)
 - V_{mp} (Tensión del punto de máxima potencia)
 - I_{mp} (Corriente del punto de máxima potencia)
 - V_{oc} (Tensión de circuito abierto)
 - Modo de operación (AUTO o Manual)

4.4 Uso de la Retroiluminación

- Presionar el botón BACKLIGHT para encender/apagar la retroiluminación.
- Condiciones de Uso: Útil en ambientes de baja iluminación, proporcionando una visibilidad clara de los valores medidos.

5. Conexión y Configuración Inicial

1. Conectar al Panel Solar:
 - Utilizar el cable MC4 para conectar el multímetro al panel solar. Conectar el terminal positivo al PV Positive Pole y el negativo al PV Negative Pole.
 - Alternativamente, utilizar los cables con pinzas tipo cocodrilo para conexiones rápidas.
2. Verificación de Polaridad:
 - Verificar la correcta conexión de los terminales positivo y negativo para evitar daños.
3. Inicialización:
 - Una vez conectados, seleccionar el modo de detección deseado (AUTO o Manual).

6. Procedimientos de Mantenimiento y Seguridad

6.1 Mantenimiento Regular

- Limpieza: Utilizar un paño seco o ligeramente humedecido para limpiar el dispositivo.
- Almacenamiento: Guardar el multímetro en el estuche EVA para protegerlo de golpes y polvo.

6.2 Seguridad Operativa

- Conexión Correcta: Verificar siempre la correcta conexión de los cables.
- Evitar Sobrecarga: No exceder los límites de potencia (400W), tensión (60V), o corriente (20A) especificados.
- Temperatura: No usar el dispositivo a temperaturas extremadamente altas. Permite que se enfríe si aparece una alerta de sobre temperatura.

7. Guía de Resolución de Problemas (Troubleshooting)

Error	Causa	Explicación
Sin Display	Conexión inversa	Verifica la polaridad de la entrada.
Display Over Power	Sobrecarga de potencia	Asegúrate de operar dentro del rango de potencia permitido.
Display Over Temperature	Sobre temperatura	Deja que el dispositivo se enfríe antes de usarlo nuevamente.
Display Over Voltage	Sobretensión	Utiliza el dispositivo dentro del rango de tensión especificado (12-60V).
Display Over Current	Sobrecorriente	Asegúrate de utilizar el dispositivo dentro del rango de corriente permitido (0-20A).

Nota: Si el problema persiste, comunícate con el servicio técnico de "Elejoy".

8. Contenido del Paquete y Accesorios

1. Multímetro Solar EL400B
2. Cable de Conexión MC4
3. Cable con Pinzas Tipo Cocodrilo
4. Estuche EVA (EVA Toolkit)
5. Manual del Usuario

9. Advertencias y Precauciones

1. Utilizar dentro de los rangos permitidos: Asegúrate siempre de operar el dispositivo dentro de los límites especificados.
2. Desconectar antes de medir: Antes de realizar cualquier prueba, desconecta el panel solar de otros equipos o cargas conectadas.
3. Protección contra sobrecarga: El dispositivo tiene protecciones incorporadas, pero es fundamental seguir las pautas para evitar activar estas protecciones innecesariamente.
4. No abrir el dispositivo: La apertura del dispositivo podría causar daños y anular la garantía del fabricante.

10. Preguntas Frecuentes (FAQ)

1. ¿Puedo usar el EL400B con un panel solar de más de 400W?
 - No. Utilizar el dispositivo con un panel solar que exceda los 400W puede dañar el equipo y anular la garantía.

2. ¿Qué ocurre si conecto incorrectamente los cables de entrada?
 - El dispositivo tiene protección contra conexión inversa, pero es recomendable verificar siempre la polaridad antes de la conexión para evitar problemas.
3. ¿Cada cuánto tiempo debo realizar el mantenimiento del dispositivo?
 - Se recomienda limpiar el dispositivo después de cada uso intensivo o una vez al mes si se utiliza regularmente.
4. ¿Qué hago si el dispositivo se apaga repentinamente?
 - Verifica si se ha activado la protección contra sobrettemperatura o si hay problemas con la conexión del panel solar.

4.1.3 Carga electrónica DL24

En el marco de esta investigación, se utilizó la carga electrónica DL24 como herramienta clave para simular condiciones de consumo controlado en los paneles solares. Este dispositivo permite **aplicar una corriente constante programable** que facilita el trazado de curvas características del panel (I-V y P-V), permitiendo así una medición precisa del punto de máxima potencia y del comportamiento del panel ante diferentes niveles de demanda.

Figura 5:

Carga electrónica DL24P (180 W)



Nota. Dispositivo utilizado para aplicar carga variable en modo corriente constante durante las pruebas experimentales.

La DL24 destaca por su compatibilidad con múltiples fuentes de energía, facilidad de conexión mediante USB y su alta capacidad de descarga, lo que la convierte en una opción económica y versátil para pruebas de laboratorio o de campo.

Especificaciones técnicas

- **Modelo:** DL24 – carga electrónica multifunción
- **Potencia máxima de descarga:** 180 W
- **Tensión máxima:** 200 V
- **Corriente máxima:** 20 A
- **Interfaz de control:** Pantalla LCD + software vía USB
- **Modo de operación principal:** Corriente constante (CC)
- **Precisión de medición:** $\pm(1\% + 2 \text{ dígitos})$
- **Alimentación del sistema:** A través del propio USB (autónoma)
- **Funciones adicionales:**
 - Protección contra sobrecorriente y sobrecalentamiento
 - Registro de datos en tiempo real
 - Gráficas de descarga mediante software para PC

Este dispositivo fue esencial para ejecutar pruebas progresivas de carga en los paneles y obtener datos confiables de potencia, corriente y tensión en intervalos constantes. Su uso permitió automatizar parte del proceso de medición, aumentando la precisión y reduciendo la posibilidad de error humano.

4.2 Resultados del Panel Monocristalino

En este acápite, se presentan los resultados obtenidos durante la prueba experimental realizada al panel solar monocristalino en condiciones reales de operación. El objetivo principal de esta evaluación fue determinar la eficiencia real del módulo fotovoltaico,

analizar su comportamiento eléctrico frente a la irradiancia disponible y la temperatura ambiente, así como validar la metodología de medición propuesta.

Las mediciones se realizaron utilizando los instrumentos previamente descritos, registrando parámetros como tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp}), corriente (I_{mp}), tensión de circuito abierto (V_{oc}) y potencia generada (P_{max}), entre otros. También se trazaron las curvas características I-V y P-V para observar gráficamente el desempeño del panel.

- Fecha: sábado 22 de marzo de 2025
- Hora de ensayo: 14:05:52 - 14:15:05
- Ubicación: Avenida El Ángel, Sonsonate, El Salvador
- Coordenadas: 13.726845, -89.718052
- Temperatura ambiente: 35°C
- Irradiancia medida: 931.6 W/m²
- Temperatura del panel (parte posterior): 62°C
- Instrumentación utilizada: SM-206, EL400B, DL24

1. Introducción

Este informe presenta la evaluación técnica de un panel solar fotovoltaico monocristalino de 50 W. El objetivo es comparar la eficiencia del panel bajo condiciones estándar (STC) y condiciones reales de campo, utilizando mediciones tomadas con instrumentos especializados.

2. Datos Técnicos del Panel

- Potencia nominal: 50 W
- Tecnología: Monocristalina
- Dimensiones totales: 600 mm x 498 mm
- Área efectiva irradiada: 458 mm x 550 mm = 0.2519 m².

3. Metodología Experimental

- a. Se expuso el panel solar al sol durante 10 minutos para permitir su aclimatación térmica.
- b. Se utilizaron el medidor MPPT EL400B y la carga electrónica DL24 para obtener valores de V_{mp} , I_{mp} y P_{max} :
 $V_{mp} = 17$ Voltios
 $I_{mp} = 2.2$ Amperios
 $P_{max} = 37.37$ W
- c. Se conectó el panel a una carga electrónica DL24 en modo de corriente constante (CC), aumentando la carga en incrementos de 0.1 A para obtener los pares de valores I-V y calcular la potencia ($P = V \times I$) por cada paso.
- d. Se capturaron datos de tensión, corriente y potencia a lo largo del tiempo, cubriendo un ciclo completo desde circuito abierto hasta cercanías del cortocircuito.

4. Cálculo de Eficiencia

La eficiencia de un panel fotovoltaico se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = (P_{max} / (G \times A)) \times 100$$

Donde:

- η : eficiencia del panel [%]
- P_{max} : Potencia máxima medida [W]
- G : Irradiancia solar [W/m^2]
- A : Área activa del panel [m^2]

Eficiencia en condiciones STC:

$$\eta = (50 / (1000 \times 0.2519)) \times 100 = 19.85\%$$

Eficiencia en condiciones reales:

$$\eta = (37.37 / (931.6 \times 0.2519)) \times 100 = 15.92\%$$

5. Tabla y Gráficas Resultantes

La Tabla 2 presenta el registro detallado de los valores eléctricos obtenidos durante la evaluación del panel solar monocristalino, como parte de la aplicación progresiva de carga

en modo corriente constante. Los datos incluyen, para cada instante de la prueba, los valores de tensión (V), corriente (A) y potencia (W) entregados por el panel bajo condiciones reales de irradiancia y temperatura.

Este conjunto de datos constituye un insumo técnico esencial para el desarrollo del análisis cuantitativo del comportamiento del módulo fotovoltaico, permitiendo la trazabilidad precisa de los parámetros eléctricos clave: tensión de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), punto de máxima potencia (P_m), así como la evolución dinámica de los valores intermedios durante la variación de carga.

Las mediciones fueron obtenidas mediante instrumentación digital especializada, asegurando confiabilidad y resolución suficiente para la construcción de curvas I-V y P-V, las cuales sustentan el análisis comparativo posterior entre tecnologías fotovoltaicas. Asimismo, el comportamiento uniforme de las variables registradas a lo largo del ensayo evidencia la estabilidad del panel monocristalino frente a la carga aplicada, incluso en condiciones de alta irradiancia ($\sim 930 \text{ W/m}^2$) y temperatura de operación superiores a los 60°C .

Esta tabla no solo documenta el comportamiento eléctrico del módulo, sino que también respalda de manera objetiva la evaluación de eficiencia real del panel bajo condiciones operativas típicas, cumpliendo un papel clave en la validación de la metodología desarrollada.

Tabla 2:

Datos recopilados durante las pruebas de carga al Panel FV Monocristalino

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:05:52	22.3	0.00	0.00
14:05:53	22.2	0.10	2.29
14:05:54	22.2	0.10	2.18
14:05:55	22.2	0.10	2.20
14:05:56	22.2	0.10	2.18
14:05:57	22.2	0.10	2.18
14:05:58	22.2	0.11	2.33

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:05:59	22.2	0.10	2.18
14:06:00	22.2	0.10	2.29
14:06:01	22.2	0.10	2.18
14:06:02	22.2	0.10	2.29
14:06:03	22.2	0.10	2.18
14:06:04	22.2	0.10	2.29
14:06:05	22.2	0.10	2.18
14:06:06	22.2	0.10	2.18
14:06:07	22.2	0.10	2.31
14:06:08	22.2	0.10	2.20
14:06:09	22.2	0.10	2.22
14:06:10	22.2	0.10	2.18
14:06:11	22.2	0.10	2.18
14:06:12	22.2	0.10	2.31
14:06:13	22.2	0.10	2.20
14:06:14	22	0.20	4.49
14:06:15	22	0.20	4.47
14:06:16	22	0.20	4.47
14:06:17	22	0.20	4.33
14:06:18	22	0.20	4.40
14:06:19	22	0.20	4.36
14:06:20	22	0.20	4.47
14:06:21	22	0.20	4.42
14:06:22	22	0.20	4.36
14:06:23	22	0.20	4.36
14:06:24	22	0.20	4.47
14:06:25	22	0.20	4.36
14:06:26	22.1	0.20	4.38
14:06:27	22	0.20	4.36

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:06:28	22	0.20	4.40
14:06:29	22	0.20	4.47
14:06:30	22	0.20	4.33
14:06:31	22	0.20	4.38
14:06:32	22	0.20	4.36
14:06:33	22	0.20	4.42
14:06:34	21.9	0.30	6.55
14:06:35	21.9	0.30	6.61
14:06:36	21.9	0.30	6.64
14:06:37	21.9	0.30	6.64
14:06:38	21.9	0.30	6.61
14:06:39	21.9	0.30	6.61
14:06:40	21.9	0.30	6.61
14:06:41	21.9	0.30	6.64
14:06:42	21.9	0.30	6.55
14:06:43	21.9	0.30	6.50
14:06:44	21.9	0.30	6.57
14:06:45	21.9	0.30	6.55
14:06:46	21.9	0.30	6.59
14:06:47	21.9	0.30	6.61
14:06:48	21.9	0.30	6.59
14:06:49	21.9	0.30	6.55
14:06:50	21.9	0.30	6.50
14:06:51	21.9	0.30	6.57
14:06:52	21.9	0.30	6.55
14:06:53	21.9	0.30	6.57
14:06:54	21.9	0.30	6.57
14:06:55	21.9	0.30	6.59
14:06:56	21.8	0.39	8.55

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:06:57	21.7	0.40	8.64
14:06:58	21.7	0.40	8.72
14:06:59	21.8	0.40	8.65
14:07:00	21.7	0.40	8.72
14:07:01	21.7	0.40	8.72
14:07:02	21.7	0.40	8.61
14:07:03	21.7	0.40	8.64
14:07:04	21.7	0.40	8.72
14:07:05	21.7	0.40	8.59
14:07:06	21.7	0.40	8.68
14:07:07	21.7	0.40	8.59
14:07:08	21.7	0.40	8.61
14:07:09	21.7	0.40	8.72
14:07:10	21.7	0.40	8.64
14:07:11	21.7	0.40	8.72
14:07:12	21.7	0.40	8.61
14:07:13	21.7	0.40	8.72
14:07:14	21.6	0.50	10.74
14:07:15	21.6	0.50	10.74
14:07:16	21.6	0.50	10.82
14:07:17	21.6	0.50	10.82
14:07:18	21.6	0.50	10.89
14:07:19	21.6	0.50	10.82
14:07:20	21.6	0.50	10.78
14:07:21	21.6	0.50	10.71
14:07:22	21.6	0.50	10.84
14:07:23	21.6	0.50	10.71
14:07:24	21.6	0.50	10.80
14:07:25	21.6	0.50	10.76

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:07:26	21.6	0.50	10.84
14:07:27	21.6	0.50	10.78
14:07:28	21.6	0.50	10.76
14:07:29	21.6	0.50	10.86
14:07:30	21.6	0.50	10.84
14:07:31	21.6	0.50	10.80
14:07:32	21.6	0.50	10.86
14:07:33	21.6	0.50	10.82
14:07:34	21.4	0.61	13.12
14:07:35	21.4	0.60	12.88
14:07:36	21.4	0.60	12.73
14:07:37	21.4	0.60	12.86
14:07:38	21.4	0.60	12.88
14:07:39	21.4	0.60	12.88
14:07:40	21.4	0.60	12.75
14:07:41	21.4	0.60	12.88
14:07:42	21.4	0.60	12.88
14:07:43	21.4	0.60	12.78
14:07:44	21.4	0.60	12.88
14:07:45	21.4	0.60	12.88
14:07:46	21.4	0.60	12.78
14:07:47	21.4	0.60	12.88
14:07:48	21.4	0.60	12.84
14:07:49	21.4	0.60	12.82
14:07:50	21.4	0.60	12.75
14:07:51	21.4	0.60	12.82
14:07:52	21.4	0.60	12.75
14:07:53	21.4	0.60	12.88
14:07:54	21.3	0.70	14.85

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:07:55	21.3	0.70	14.87
14:07:56	21.3	0.70	14.93
14:07:57	21.3	0.70	14.93
14:07:58	21.3	0.70	14.93
14:07:59	21.3	0.70	14.93
14:08:00	21.3	0.70	14.87
14:08:01	21.3	0.70	14.95
14:08:02	21.3	0.70	14.87
14:08:03	21.3	0.70	14.93
14:08:04	21.3	0.70	14.93
14:08:05	21.3	0.70	14.93
14:08:06	21.3	0.70	14.91
14:08:07	21.3	0.70	14.95
14:08:08	21.3	0.70	14.93
14:08:09	21.3	0.70	14.95
14:08:10	21.3	0.70	14.93
14:08:11	21.3	0.70	14.89
14:08:12	21.3	0.70	14.85
14:08:13	21.2	0.70	14.90
14:08:14	21.1	0.80	16.80
14:08:15	21.1	0.80	16.86
14:08:16	21.1	0.80	16.77
14:08:17	21.1	0.80	16.90
14:08:18	21.1	0.80	16.90
14:08:19	21.1	0.80	16.90
14:08:20	21.1	0.80	16.90
14:08:21	21.1	0.80	16.88
14:08:22	21.1	0.80	16.84
14:08:23	21.1	0.80	16.90

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:08:24	21.1	0.80	16.90
14:08:25	21.1	0.80	16.84
14:08:26	21.1	0.80	16.90
14:08:27	21.1	0.80	16.90
14:08:28	21.1	0.80	16.90
14:08:29	21.1	0.80	16.90
14:08:30	21.1	0.80	16.80
14:08:31	21.1	0.80	16.84
14:08:32	21.1	0.80	16.86
14:08:33	21.1	0.80	16.88
14:08:34	20.9	0.90	18.85
14:08:35	20.9	0.90	18.81
14:08:36	20.9	0.90	18.81
14:08:37	20.9	0.90	18.81
14:08:38	20.9	0.90	18.81
14:08:39	20.9	0.90	18.81
14:08:40	20.9	0.90	18.81
14:08:41	20.9	0.90	18.81
14:08:42	20.9	0.90	18.81
14:08:43	20.9	0.90	18.81
14:08:44	20.9	0.90	18.81
14:08:45	20.9	0.90	18.81
14:08:46	20.9	0.90	18.81
14:08:47	20.9	0.90	18.81
14:08:48	20.9	0.90	18.81
14:08:49	20.9	0.90	18.81
14:08:50	20.9	0.90	18.81
14:08:51	20.9	0.90	18.81
14:08:52	20.9	0.90	18.81

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:08:53	20.9	0.94	19.54
14:08:54	20.8	1.00	20.78
14:08:55	20.8	1.00	20.78
14:08:56	20.8	1.00	20.78
14:08:57	20.8	1.00	20.78
14:08:58	20.8	1.00	20.78
14:08:59	20.8	1.00	20.78
14:09:00	20.8	1.00	20.78
14:09:01	20.8	1.00	20.78
14:09:02	20.8	1.00	20.78
14:09:03	20.8	1.00	20.78
14:09:04	20.8	1.00	20.86
14:09:05	20.8	1.00	20.78
14:09:06	20.8	1.00	20.76
14:09:07	20.8	1.00	20.86
14:09:08	20.8	1.00	20.76
14:09:09	20.8	1.00	20.82
14:09:10	20.8	1.00	20.78
14:09:11	20.8	1.00	20.84
14:09:12	20.8	1.00	20.78
14:09:13	20.8	1.00	20.78
14:09:14	20.6	1.08	22.31
14:09:15	20.6	1.10	22.68
14:09:16	20.6	1.10	22.74
14:09:17	20.6	1.10	22.62
14:09:18	20.6	1.10	22.62
14:09:19	20.6	1.10	22.62
14:09:20	20.6	1.10	22.66
14:09:21	20.6	1.10	22.64

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:09:22	20.6	1.10	22.62
14:09:23	20.6	1.10	22.62
14:09:24	20.6	1.09	22.47
14:09:25	20.6	1.10	22.66
14:09:26	20.6	1.10	22.66
14:09:27	20.6	1.10	22.62
14:09:28	20.6	1.10	22.60
14:09:29	20.6	1.10	22.62
14:09:30	20.6	1.10	22.72
14:09:31	20.6	1.10	22.62
14:09:32	20.6	1.10	22.62
14:09:33	20.6	1.10	22.72
14:09:34	20.4	1.20	24.52
14:09:35	20.4	1.20	24.52
14:09:36	20.4	1.20	24.52
14:09:37	20.4	1.20	24.46
14:09:38	20.4	1.20	24.42
14:09:39	20.4	1.20	24.42
14:09:40	20.4	1.20	24.48
14:09:41	20.4	1.20	24.42
14:09:42	20.4	1.20	24.46
14:09:43	20.4	1.20	24.52
14:09:44	20.4	1.20	24.52
14:09:45	20.4	1.20	24.42
14:09:46	20.4	1.20	24.42
14:09:47	20.4	1.20	24.42
14:09:48	20.4	1.20	24.42
14:09:49	20.4	1.20	24.54
14:09:50	20.4	1.20	24.42

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:09:51	20.4	1.20	24.48
14:09:52	20.4	1.20	24.42
14:09:53	20.2	1.24	25.13
14:09:54	20.2	1.30	26.22
14:09:55	20.2	1.30	26.18
14:09:56	20.2	1.30	26.28
14:09:57	20.2	1.30	26.28
14:09:58	20.2	1.30	26.28
14:09:59	20.2	1.30	26.28
14:10:00	20.2	1.30	26.28
14:10:01	20.2	1.30	26.28
14:10:02	20.2	1.30	26.28
14:10:03	20.2	1.30	26.28
14:10:04	20.2	1.30	26.22
14:10:05	20.2	1.30	26.16
14:10:06	20.2	1.30	26.20
14:10:07	20.2	1.30	26.22
14:10:08	20.2	1.30	26.28
14:10:09	20.2	1.29	25.98
14:10:10	20.2	1.30	26.26
14:10:11	20.2	1.30	26.22
14:10:12	20.2	1.30	26.26
14:10:13	20.2	1.30	26.26
14:10:14	20	1.40	28.00
14:10:15	20	1.40	27.98
14:10:16	20	1.40	28.00
14:10:17	20	1.40	27.98
14:10:18	20	1.40	27.98
14:10:19	20	1.40	27.98

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:10:20	20	1.40	27.98
14:10:21	20	1.40	27.98
14:10:22	20	1.40	27.98
14:10:23	20	1.40	28.02
14:10:24	20	1.40	27.98
14:10:25	20	1.40	27.98
14:10:26	20	1.40	27.98
14:10:27	20	1.40	27.98
14:10:28	20	1.40	27.98
14:10:29	20	1.40	27.98
14:10:30	20	1.40	27.98
14:10:31	20	1.40	27.98
14:10:32	20	1.40	27.98
14:10:33	19.9	1.44	28.70
14:10:34	19.7	1.50	29.51
14:10:35	19.7	1.50	29.51
14:10:36	19.7	1.50	29.61
14:10:37	19.7	1.50	29.51
14:10:38	19.7	1.50	29.57
14:10:39	19.7	1.50	29.51
14:10:40	19.7	1.50	29.51
14:10:41	19.7	1.50	29.53
14:10:42	19.7	1.50	29.51
14:10:43	19.7	1.50	29.51
14:10:44	19.7	1.50	29.57
14:10:45	19.7	1.50	29.49
14:10:46	19.7	1.50	29.57
14:10:47	19.7	1.50	29.51
14:10:48	19.7	1.50	29.57

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:10:49	19.7	1.50	29.63
14:10:50	19.7	1.50	29.51
14:10:51	19.7	1.50	29.55
14:10:52	19.8	1.50	29.64
14:10:53	19.8	1.50	29.72
14:10:54	19.5	1.60	31.24
14:10:55	19.5	1.60	31.24
14:10:56	19.5	1.60	31.14
14:10:57	19.5	1.60	31.14
14:10:58	19.5	1.60	31.16
14:10:59	19.5	1.60	31.14
14:11:00	19.5	1.60	31.18
14:11:01	19.5	1.60	31.14
14:11:02	19.5	1.60	31.12
14:11:03	19.5	1.60	31.14
14:11:04	19.5	1.60	31.24
14:11:05	19.5	1.60	31.14
14:11:06	19.5	1.60	31.16
14:11:07	19.5	1.60	31.22
14:11:08	19.5	1.60	31.12
14:11:09	19.5	1.60	31.14
14:11:10	19.5	1.60	31.14
14:11:11	19.5	1.60	31.14
14:11:12	19.5	1.60	31.12
14:11:13	19.4	1.60	31.08
14:11:14	19.2	1.70	32.64
14:11:15	19.3	1.70	32.71
14:11:16	19.3	1.70	32.79
14:11:17	19.3	1.70	32.77

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:11:18	19.3	1.70	32.79
14:11:19	19.3	1.70	32.75
14:11:20	19.3	1.70	32.83
14:11:21	19.3	1.70	32.81
14:11:22	19.3	1.70	32.81
14:11:23	19.3	1.70	32.81
14:11:24	19.3	1.70	32.83
14:11:25	19.3	1.70	32.83
14:11:26	19.3	1.70	32.83
14:11:27	19.3	1.70	32.83
14:11:28	19.3	1.70	32.83
14:11:29	19.3	1.70	32.83
14:11:30	19.3	1.70	32.81
14:11:31	19.3	1.70	32.83
14:11:32	19.3	1.70	32.83
14:11:33	19.3	1.70	32.83
14:11:34	19	1.80	34.26
14:11:35	19	1.80	34.18
14:11:36	19	1.80	34.18
14:11:37	19	1.80	34.18
14:11:38	19	1.80	34.18
14:11:39	19	1.80	34.16
14:11:40	19	1.80	34.18
14:11:41	19	1.80	34.18
14:11:42	19	1.80	34.18
14:11:43	19	1.80	34.18
14:11:44	19	1.80	34.18
14:11:45	19	1.80	34.28
14:11:46	19	1.80	34.26

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:11:47	18.9	1.80	33.98
14:11:48	18.9	1.80	33.98
14:11:49	19	1.80	34.16
14:11:50	18.9	1.80	33.98
14:11:51	19	1.80	34.18
14:11:52	19	1.80	34.28
14:11:53	19	1.80	34.28
14:11:54	19	1.80	34.20
14:11:55	18.9	1.80	34.10
14:11:56	19	1.80	34.20
14:11:57	18.9	1.80	34.06
14:11:58	18.9	1.80	34.00
14:11:59	18.9	1.80	34.02
14:12:00	19	1.80	34.22
14:12:01	19	1.80	34.16
14:12:02	19	1.80	34.18
14:12:03	19	1.80	34.18
14:12:04	18.7	1.89	35.38
14:12:05	18.6	1.90	35.30
14:12:06	18.6	1.90	35.28
14:12:07	18.6	1.90	35.30
14:12:08	18.6	1.90	35.40
14:12:09	18.6	1.90	35.30
14:12:10	18.6	1.90	35.28
14:12:11	18.6	1.90	35.30
14:12:12	18.6	1.90	35.30
14:12:13	18.6	1.90	35.34
14:12:14	18.6	1.90	35.34
14:12:15	18.6	1.90	35.32

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:12:16	18.6	1.90	35.30
14:12:17	18.6	1.90	35.28
14:12:18	18.6	1.90	35.28
14:12:19	18.6	1.90	35.30
14:12:20	18.6	1.90	35.28
14:12:21	18.6	1.90	35.28
14:12:22	18.6	1.90	35.30
14:12:23	18.6	1.90	35.28
14:12:24	18.6	1.90	35.32
14:12:25	18.6	1.90	35.40
14:12:26	18.6	1.90	35.38
14:12:27	18.6	1.90	35.28
14:12:28	18.6	1.90	35.28
14:12:29	18.6	1.90	35.28
14:12:30	18.6	1.90	35.34
14:12:31	18.6	1.90	35.34
14:12:32	18.6	1.90	35.38
14:12:33	18.5	1.90	35.15
14:12:34	18.2	2.00	36.42
14:12:35	18.2	2.00	36.31
14:12:36	18.2	2.00	36.33
14:12:37	18.2	2.00	36.42
14:12:38	18.2	2.00	36.35
14:12:39	18.2	2.00	36.35
14:12:40	18.2	2.00	36.38
14:12:41	18.2	2.00	36.42
14:12:42	18.2	2.00	36.35
14:12:43	18.2	2.00	36.33
14:12:44	18.2	2.00	36.40

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:12:45	18.2	2.00	36.40
14:12:46	18.2	2.00	36.36
14:12:47	18.2	2.00	36.35
14:12:48	18.2	2.00	36.35
14:12:49	18.2	2.00	36.36
14:12:50	18.2	2.00	36.36
14:12:51	18.2	2.00	36.38
14:12:52	18.2	2.00	36.42
14:12:53	18.2	2.00	36.33
14:12:54	18.2	2.00	36.40
14:12:55	18.2	2.00	36.42
14:12:56	18.2	2.00	36.33
14:12:57	18.2	2.00	36.42
14:12:58	18.2	2.00	36.40
14:12:59	18.2	2.00	36.35
14:13:00	18.2	2.00	36.31
14:13:01	18.2	2.00	36.40
14:13:02	18.2	2.00	36.40
14:13:03	18.2	2.00	36.42
14:13:04	17.7	2.10	37.15
14:13:05	17.7	2.10	37.15
14:13:06	17.7	2.10	37.15
14:13:07	17.7	2.10	37.15
14:13:08	17.7	2.10	37.15
14:13:09	17.7	2.10	37.15
14:13:10	17.7	2.10	37.15
14:13:11	17.7	2.10	37.15
14:13:12	17.7	2.10	37.15
14:13:13	17.7	2.10	37.15

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:13:14	17.7	2.10	37.15
14:13:15	17.7	2.10	37.15
14:13:16	17.7	2.10	37.15
14:13:17	17.7	2.10	37.15
14:13:18	17.8	2.09	37.20
14:13:19	17.7	2.10	37.15
14:13:20	17.7	2.10	37.15
14:13:21	17.7	2.10	37.15
14:13:22	17.7	2.10	37.15
14:13:23	17.7	2.10	37.15
14:13:24	17.7	2.10	37.15
14:13:25	17.7	2.10	37.15
14:13:26	17.7	2.10	37.15
14:13:27	17.7	2.10	37.15
14:13:28	17.7	2.10	37.15
14:13:29	17.7	2.10	37.15
14:13:30	17.7	2.10	37.15
14:13:31	17.7	2.10	37.15
14:13:32	17.7	2.10	37.15
14:13:33	17.7	2.10	37.15
14:13:34	16.9	2.20	37.18
14:13:35	16.9	2.20	37.23
14:13:36	17	2.20	37.37
14:13:37	17	2.20	37.35
14:13:38	17	2.20	37.37
14:13:39	17	2.20	37.37
14:13:40	17	2.20	37.35
14:13:41	17	2.20	37.37
14:13:42	16.9	2.20	37.23

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:13:43	16.9	2.20	37.16
14:13:44	16.9	2.20	37.15
14:13:45	16.9	2.20	37.13
14:13:46	16.9	2.20	37.13
14:13:47	16.9	2.20	37.23
14:13:48	16.9	2.20	37.13
14:13:49	16.9	2.20	37.18
14:13:50	16.9	2.20	37.23
14:13:51	17	2.20	37.37
14:13:52	16.9	2.20	37.20
14:13:53	16.9	2.20	37.13
14:13:54	16.9	2.20	37.20
14:13:55	16.9	2.20	37.21
14:13:56	16.9	2.20	37.15
14:13:57	16.9	2.20	37.21
14:13:58	17	2.20	37.37
14:13:59	16.9	2.20	37.20
14:14:00	17	2.20	37.35
14:14:01	16.9	2.20	37.23
14:14:02	16.9	2.20	37.13
14:14:03	17	2.20	37.37
14:14:04	15.8	2.29	36.18
14:14:05	15.8	2.30	36.34
14:14:06	15.7	2.30	36.09
14:14:07	15.7	2.30	36.05
14:14:08	15.6	2.30	35.86
14:14:09	15.6	2.30	35.91
14:14:10	15.7	2.30	36.03
14:14:11	15.7	2.30	36.05

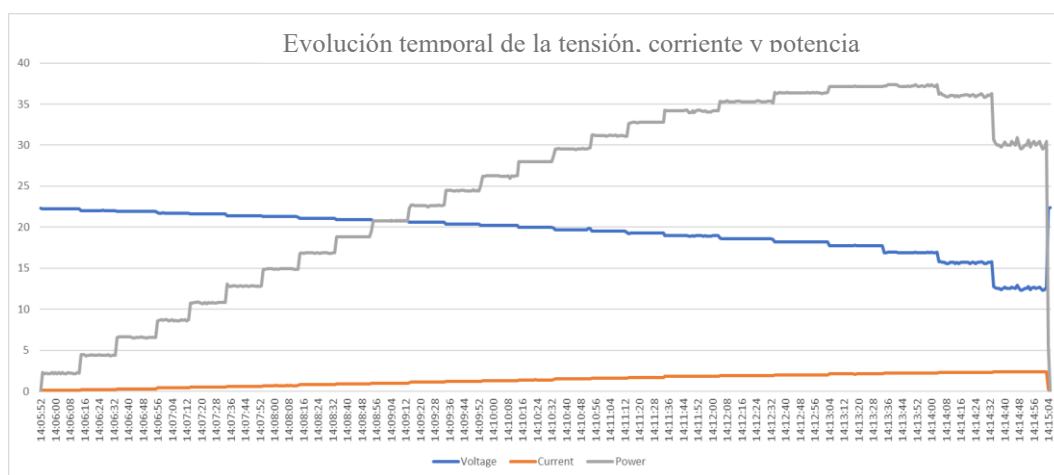
Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:14:12	15.7	2.30	36.05
14:14:13	15.6	2.30	35.91
14:14:14	15.7	2.30	36.05
14:14:15	15.6	2.30	35.91
14:14:16	15.7	2.30	36.06
14:14:17	15.7	2.30	36.05
14:14:18	15.7	2.30	36.11
14:14:19	15.7	2.30	36.11
14:14:20	15.7	2.30	36.14
14:14:21	15.6	2.30	35.94
14:14:22	15.7	2.30	36.09
14:14:23	15.7	2.30	36.09
14:14:24	15.6	2.30	35.91
14:14:25	15.7	2.30	36.06
14:14:26	15.7	2.30	36.14
14:14:27	15.8	2.30	36.29
14:14:28	15.7	2.30	36.08
14:14:29	15.6	2.30	35.83
14:14:30	15.6	2.30	35.90
14:14:31	15.7	2.30	36.09
14:14:32	15.7	2.30	36.05
14:14:33	15.8	2.30	36.28
14:14:34	12.8	2.40	30.68
14:14:35	12.6	2.40	30.20
14:14:36	12.5	2.40	29.98
14:14:37	12.5	2.40	30.00
14:14:38	12.4	2.40	29.76
14:14:39	12.5	2.40	30.00
14:14:40	12.7	2.40	30.42

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
14:14:41	12.5	2.40	30.00
14:14:42	12.5	2.40	30.00
14:14:43	12.5	2.40	29.99
14:14:44	12.7	2.40	30.47
14:14:45	12.6	2.40	30.24
14:14:46	12.5	2.40	30.00
14:14:47	12.9	2.40	30.90
14:14:48	12.5	2.40	30.00
14:14:49	12.3	2.40	29.52
14:14:50	12.4	2.40	29.71
14:14:51	12.5	2.40	30.01
14:14:52	12.5	2.40	30.00
14:14:53	12.8	2.39	30.64
14:14:54	12.4	2.40	29.76
14:14:55	12.6	2.40	30.20
14:14:56	12.7	2.40	30.45
14:14:57	12.5	2.40	30.00
14:14:58	12.6	2.40	30.25
14:14:59	12.7	2.40	30.44
14:15:00	12.5	2.40	30.00
14:15:01	12.3	2.40	29.52
14:15:02	12.4	2.40	29.76
14:15:03	12.7	2.40	30.48
14:15:04	22.2	0.25	5.55
14:15:05	22.4	0.00	0.00

Nota. Presenta los datos experimentales recopilados durante las pruebas de carga aplicadas al panel solar monocristalino, incluyendo tensión, corriente y potencia en diferentes momentos.

Figura 6:

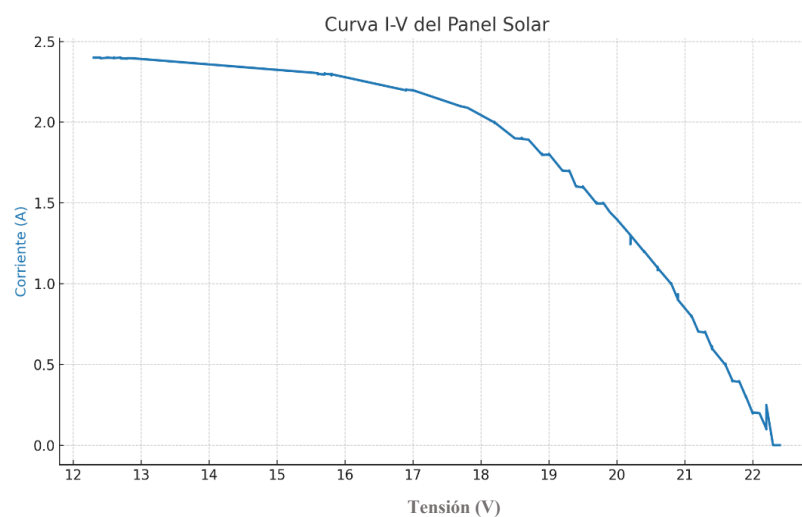
Evolución temporal en parámetros eléctricos de panel Monocristalino



Nota. Gráfico que muestra tensión, corriente y potencia durante la carga progresiva aplicada al módulo.

Figura 7:

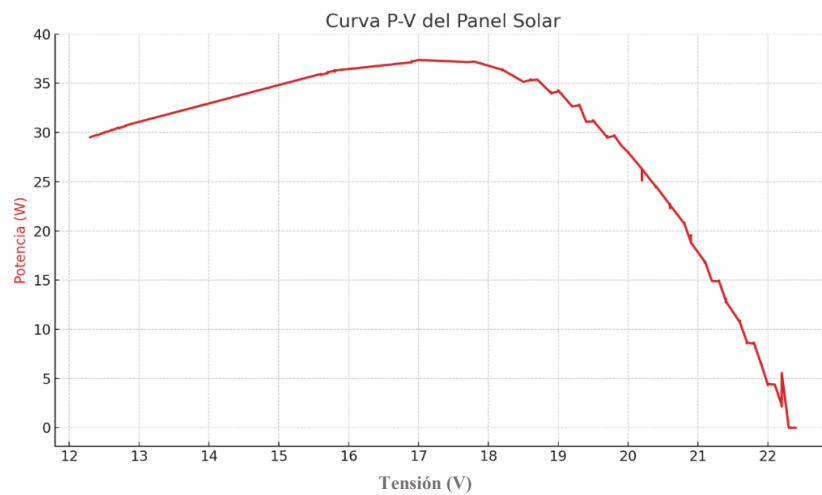
Curva característica de corriente contra tensión (I-V) – Panel Monocristalino



Nota. Relación entre corriente y tensión bajo carga variable, con identificación del comportamiento típico de un panel solar.

Figura 8:

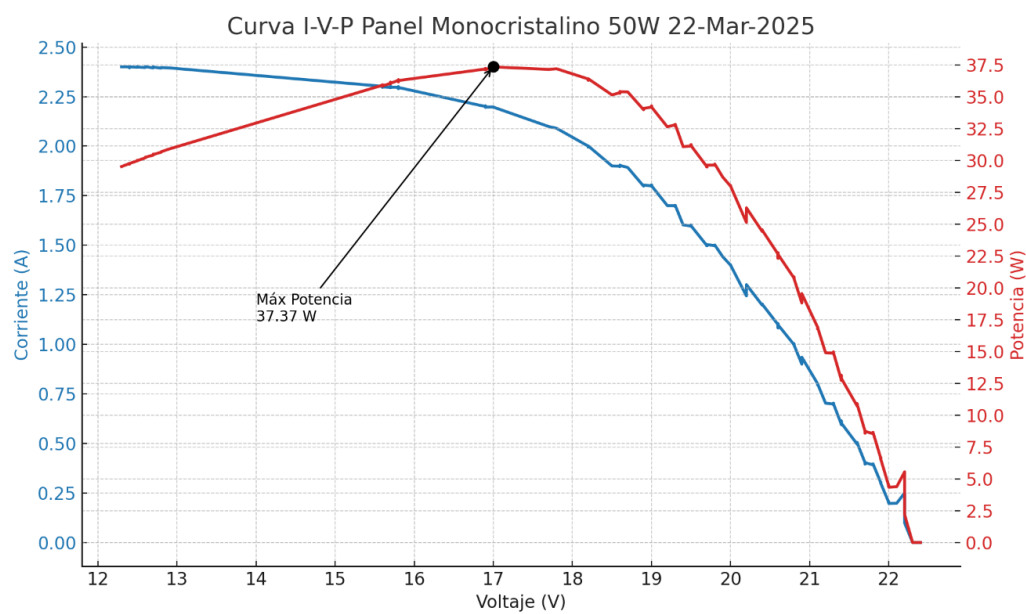
Curva P-V del Panel Solar Monocristalino



Nota. Gráfico de potencia en función de la tensión, destacando el punto de máxima potencia durante el ensayo.

Figura 9:

Curva de I-V-P Panel Monocristalino 50W. (22 de Marzo 2025).



Nota. Curvas simultáneas de corriente y potencia en función de la tensión; se destaca el punto de máxima potencia.

6. Análisis de Resultados (Revisado con Corrección por Temperatura)

El valor de eficiencia en campo fue del 15.92%, mientras que en condiciones estándar (STC) es del 19.85%. Esta diferencia se atribuye a varios factores, entre ellos:

- Elevada temperatura del módulo (62 °C) frente a los 25 °C de referencia en STC.
- Irradiancia medida inferior al estándar (931.6 W/m² frente a 1000 W/m²).
- Pérdidas ópticas y eléctricas bajo condiciones reales.

- Para cuantificar el efecto de la temperatura, se aplica la corrección con coeficiente térmico típico de $\gamma = -0.0045$ /°C.

Y considerando la diferencia de temperatura:

$$\Delta T = T_{\text{mod}} - T_{\text{STC}} = 62 - 25 = 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Aplicando la corrección a la eficiencia STC:

$$\eta_{\text{corregida}} = 19.85\% \times [1 + (-0.0045 \times 37)] \approx 16.54\%$$

Esto sugiere que, únicamente por efecto térmico, la eficiencia esperada debería reducirse a aproximadamente 16.54%, lo cual es mayor que la eficiencia real observada (15.92%). La diferencia restante puede atribuirse a:

- Ineficiencias del sistema de medición.
- Pérdidas por reflexión, suciedad o ángulo de incidencia.
- Posible degradación del panel si es de uso prolongado.

7. Conclusiones

- El punto de máxima potencia real se identificó correctamente utilizando el método de carga progresiva.
- La eficiencia real del panel fue inferior a la nominal, lo cual es coherente con el comportamiento térmico y lumínico observado.
- Las gráficas I-V y P-V reflejan adecuadamente el comportamiento típico del panel bajo condiciones controladas.

8. Recomendaciones

- Repetir la prueba con diferentes orientaciones e inclinaciones del panel para verificar impacto angular.

- Realizar pruebas comparativas en distintos horarios para observar la variación diaria.
- Aplicar métodos de corrección térmica para comparar directamente con STC si se requiere validación de catálogo.

9. Registro fotográfico

Figura 10:

Medición de irradiancia durante ensayo al Panel Monocristalino



Nota. Registro de irradiancia solar con el medidor SM206 durante las pruebas de campo.

Figura 11:

Medidor multímetro solar EL400B (Panel Monocristalino)



Nota. Pantalla del dispositivo mostrando Pmax, Vmp, Imp y Voc en tiempo real.

Figura 12:

Temperatura °C tomada a panel FV Monocristalino (prueba en campo)



Nota. Lectura con termómetro infrarrojo posterior a la aplicación de carga máxima.

4.3 Resultados del Panel Policristalino

En este apartado se exponen los resultados experimentales correspondientes al panel solar policristalino, bajo condiciones climáticas similares a las del panel monocristalino. Esta prueba forma parte del proceso de validación de la metodología propuesta, la cual busca evaluar el desempeño real de distintos tipos de módulos fotovoltaicos utilizando instrumentación accesible y condiciones de operación reales.

Al igual que en la prueba anterior, se aplicó la metodología para registrar y analizar los parámetros eléctricos relevantes del módulo en campo. El propósito fue comparar su rendimiento real frente a las especificaciones nominales bajo condiciones estándar (STC) y evaluar su eficiencia energética en función de la irradiancia y la temperatura medida durante la prueba.

- Fecha: sábado 22 de marzo de 2025
- Hora de ensayo: 13:28:56 - 13:37:25
- Ubicación: Avenida El Ángel, Sonsonate, El Salvador
- Coordenadas: 13.726845, -89.718052

- Temperatura ambiente: 35°C
- Irradiancia medida: 954.4 W/m² (Foto 1)
- Temperatura del panel (parte posterior): 62.8°C (Foto 3)
- Instrumentación utilizada: SM-206, EL400B, DL24

1. Introducción

Este informe presenta la evaluación técnica de un panel solar fotovoltaico policristalino de 50 W. El objetivo es comparara la eficiencia del panel bajo condiciones estándar (STC) y condiciones reales de campo, utilizando mediciones tomadas con instrumentos especializados.

2. Datos Técnicos del Panel (Figura 12)

- Potencia nominal: 50 W
- Tecnología: Policristalina
- Dimensiones totales: 519 mm x 680 mm
- Área efectiva irradiada: 498 mm x 601 mm = 0.299 m²

3. Metodología Experimental

- Se expuso el panel solar al sol durante 10 minutos para permitir su aclimatación térmica.
- Se utilizaron el medidor MPPT EL400B y la carga electrónica DL24 para obtener valores de V_{mp} , I_{mp} y P_{max} :
- $V_{mp} = 14.81$ Voltios
- $I_{mp} = 2.15$ Amperios
- $P_{max} = 31.84$ W
- Se conectó el panel a una carga electrónica DL24 en modo de corriente constante (CC), aumentando la carga en incrementos de 0.1 A para obtener los pares de valores I-V y calcular la potencia ($P = V \times I$) por cada paso. (Foto 3 & 4)
- Se capturaron datos de tensión, corriente y potencia a lo largo del tiempo, cubriendo un ciclo completo desde circuito abierto hasta cercanías del cortocircuito.

4. Cálculo de Eficiencia

La eficiencia de un panel fotovoltaico se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = (P_{\max} / (G \times A)) \times 100$$

Donde:

- η : eficiencia del panel [%]
- $P_{\max}$: Potencia máxima medida [W]
- G : Irradiancia solar [W/m^2]
- A : Área activa del panel [m^2]

Eficiencia en condiciones STC:

$$\eta = (50 / (1000 \times 0.2993)) \times 100 = 16.71\%$$

Eficiencia en condiciones reales:

$$\eta = (31.84 / (954.4 \times 0.2993)) \times 100 = 11.15\%$$

5. Tablas y Gráficas Resultantes

La Tabla 3 contiene el registro ordenado de los valores eléctricos obtenidos durante el ensayo realizado al panel solar policristalino, bajo condiciones reales de operación y mediante una aplicación controlada de carga en modo corriente constante. Para cada intervalo de tiempo, se documentan los valores de tensión (V), corriente (A) y potencia (W) generados por el módulo.

Este registro forma parte fundamental del proceso de análisis técnico del comportamiento eléctrico del panel policristalino, permitiendo identificar parámetros claves como la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (I_{sc}), así como el punto de máxima potencia (P_m). Además, estos datos sirven como insumo directo para la generación de curvas características I-V y P-V, esenciales en la evaluación del rendimiento energético del módulo. Las mediciones fueron realizadas con instrumentos digitales de alta precisión, asegurando exactitud y coherencia en la adquisición de datos. El comportamiento mostrado en esta tabla evidencia una respuesta más limitada del panel frente a incrementos de carga, observándose una tendencia a estabilizarse rápidamente en valores de corriente y potencia relativamente bajos. Este comportamiento es indicativo de una menor capacidad de aprovechamiento

energético frente a su contraparte monocristalina, especialmente bajo condiciones de temperatura elevada e irradiancia intensa.

El análisis de estos datos, en conjunto con los valores del panel monocristalino, permite una comparación técnica detallada que valida la elección tecnológica más adecuada en términos de eficiencia efectiva, tolerancia térmica y densidad energética, de acuerdo con los objetivos establecidos en la investigación.

Tabla 3:

Datos recopilados durante las pruebas de carga al Panel FV Policristalino

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:28:56	19.3	0.000	0.00
13:28:57	19.3	0.000	0.00
13:28:58	19.1	0.104	1.99
13:28:59	19.2	0.100	1.92
13:29:00	19.2	0.100	1.92
13:29:01	19.2	0.100	1.92
13:29:02	19.2	0.100	1.92
13:29:03	19.2	0.100	1.92
13:29:04	19.2	0.100	1.92
13:29:05	19.2	0.100	1.92
13:29:06	19.2	0.100	1.92
13:29:07	19.2	0.100	1.92
13:29:08	19.2	0.100	1.92
13:29:09	19.2	0.100	1.92
13:29:10	19.2	0.100	1.92
13:29:11	19.2	0.100	1.92
13:29:12	19.2	0.100	1.92
13:29:13	19.2	0.100	1.92
13:29:14	19.2	0.100	1.92

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:29:15	19.2	0.100	1.92
13:29:16	19.2	0.100	1.92
13:29:17	19.2	0.100	1.92
13:29:18	19.2	0.100	1.92
13:29:19	19.2	0.100	1.92
13:29:20	19.2	0.100	1.92
13:29:21	19.2	0.100	1.92
13:29:22	19.2	0.100	1.92
13:29:23	19.2	0.100	1.92
13:29:24	19.2	0.100	1.92
13:29:25	19.2	0.100	1.92
13:29:26	19.1	0.105	2.01
13:29:27	19.2	0.099	1.90
13:29:28	19.1	0.152	2.90
13:29:29	19	0.199	3.78
13:29:30	19	0.199	3.78
13:29:31	19	0.199	3.78
13:29:32	19	0.200	3.80
13:29:33	19	0.205	3.90
13:29:34	19	0.199	3.78
13:29:35	19	0.203	3.86
13:29:36	19	0.203	3.86
13:29:37	19	0.204	3.88
13:29:38	19	0.204	3.88
13:29:39	19	0.199	3.78
13:29:40	19	0.205	3.90
13:29:41	19	0.199	3.78
13:29:42	19	0.202	3.84
13:29:43	19	0.199	3.78

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:29:44	19	0.199	3.78
13:29:45	19	0.199	3.78
13:29:46	19	0.204	3.88
13:29:47	19	0.204	3.88
13:29:48	18.9	0.277	5.24
13:29:49	18.9	0.298	5.63
13:29:50	18.9	0.301	5.69
13:29:51	18.9	0.298	5.63
13:29:52	18.9	0.298	5.63
13:29:53	18.9	0.304	5.75
13:29:54	18.9	0.298	5.63
13:29:55	18.9	0.304	5.75
13:29:56	18.9	0.299	5.65
13:29:57	18.9	0.298	5.63
13:29:58	18.9	0.303	5.73
13:29:59	18.9	0.301	5.69
13:30:00	18.9	0.298	5.63
13:30:01	18.9	0.300	5.67
13:30:02	18.9	0.298	5.63
13:30:03	18.9	0.302	5.71
13:30:04	18.9	0.298	5.63
13:30:05	18.9	0.298	5.63
13:30:06	18.9	0.301	5.69
13:30:07	18.9	0.298	5.63
13:30:08	18.9	0.301	5.69
13:30:09	18.8	0.401	7.54
13:30:10	18.8	0.397	7.46
13:30:11	18.8	0.398	7.48
13:30:12	18.8	0.398	7.48

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:30:13	18.8	0.398	7.48
13:30:14	18.8	0.399	7.50
13:30:15	18.8	0.398	7.48
13:30:16	18.8	0.402	7.56
13:30:17	18.8	0.401	7.54
13:30:18	18.8	0.398	7.48
13:30:19	18.8	0.401	7.54
13:30:20	18.8	0.403	7.58
13:30:21	18.8	0.398	7.48
13:30:22	18.8	0.404	7.60
13:30:23	18.8	0.398	7.48
13:30:24	18.8	0.404	7.60
13:30:25	18.8	0.400	7.52
13:30:26	18.8	0.398	7.48
13:30:27	18.8	0.398	7.48
13:30:28	18.8	0.398	7.48
13:30:29	18.7	0.501	9.37
13:30:30	18.7	0.500	9.35
13:30:31	18.7	0.498	9.31
13:30:32	18.7	0.499	9.33
13:30:33	18.7	0.497	9.29
13:30:34	18.7	0.498	9.31
13:30:35	18.7	0.498	9.31
13:30:36	18.7	0.501	9.37
13:30:37	18.7	0.503	9.41
13:30:38	18.7	0.502	9.39
13:30:39	18.7	0.503	9.41
13:30:40	18.7	0.501	9.37
13:30:41	18.7	0.497	9.29

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:30:42	18.7	0.498	9.31
13:30:43	18.7	0.503	9.41
13:30:44	18.7	0.503	9.41
13:30:45	18.7	0.501	9.37
13:30:46	18.7	0.502	9.39
13:30:47	18.7	0.502	9.39
13:30:48	18.7	0.503	9.41
13:30:49	18.5	0.599	11.08
13:30:50	18.5	0.596	11.03
13:30:51	18.5	0.598	11.06
13:30:52	18.5	0.602	11.14
13:30:53	18.5	0.602	11.14
13:30:54	18.5	0.599	11.08
13:30:55	18.5	0.602	11.14
13:30:56	18.5	0.598	11.06
13:30:57	18.5	0.602	11.14
13:30:58	18.5	0.601	11.12
13:30:59	18.5	0.596	11.03
13:31:00	18.5	0.603	11.16
13:31:01	18.5	0.599	11.08
13:31:02	18.5	0.597	11.04
13:31:03	18.5	0.603	11.16
13:31:04	18.5	0.597	11.04
13:31:05	18.5	0.600	11.10
13:31:06	18.5	0.603	11.16
13:31:07	18.5	0.597	11.04
13:31:08	18.5	0.599	11.08
13:31:09	18.4	0.700	12.88
13:31:10	18.4	0.702	12.92

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:31:11	18.4	0.700	12.88
13:31:12	18.4	0.699	12.86
13:31:13	18.4	0.702	12.92
13:31:14	18.4	0.702	12.92
13:31:15	18.4	0.700	12.88
13:31:16	18.4	0.702	12.92
13:31:17	18.4	0.699	12.86
13:31:18	18.4	0.697	12.82
13:31:19	18.4	0.698	12.84
13:31:20	18.4	0.701	12.90
13:31:21	18.4	0.699	12.86
13:31:22	18.4	0.702	12.92
13:31:23	18.4	0.699	12.86
13:31:24	18.4	0.702	12.92
13:31:25	18.4	0.702	12.92
13:31:26	18.4	0.701	12.90
13:31:27	18.4	0.698	12.84
13:31:28	18.4	0.698	12.84
13:31:29	18.3	0.801	14.66
13:31:30	18.3	0.802	14.68
13:31:31	18.3	0.802	14.68
13:31:32	18.3	0.802	14.68
13:31:33	18.3	0.802	14.68
13:31:34	18.3	0.801	14.66
13:31:35	18.3	0.800	14.64
13:31:36	18.3	0.800	14.64
13:31:37	18.3	0.799	14.62
13:31:38	18.3	0.800	14.64
13:31:39	18.3	0.797	14.59

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:31:40	18.3	0.796	14.57
13:31:41	18.3	0.801	14.66
13:31:42	18.3	0.802	14.68
13:31:43	18.3	0.802	14.68
13:31:44	18.3	0.802	14.68
13:31:45	18.3	0.801	14.66
13:31:46	18.3	0.802	14.68
13:31:47	18.3	0.801	14.66
13:31:49	18.1	0.899	16.27
13:31:50	18.1	0.900	16.29
13:31:51	18.1	0.901	16.31
13:31:52	18.1	0.901	16.31
13:31:53	18.1	0.901	16.31
13:31:54	18.1	0.900	16.29
13:31:55	18.1	0.901	16.31
13:31:56	18.1	0.901	16.31
13:31:57	18.1	0.900	16.29
13:31:58	18.1	0.900	16.29
13:31:59	18.1	0.901	16.31
13:32:00	18.1	0.901	16.31
13:32:01	18.1	0.900	16.29
13:32:02	18.1	0.901	16.31
13:32:03	18.1	0.900	16.29
13:32:04	18.1	0.901	16.31
13:32:05	18.1	0.901	16.31
13:32:06	18.1	0.900	16.29
13:32:07	18.1	0.900	16.29
13:32:08	18.1	0.900	16.29
13:32:09	18.1	0.899	16.27

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:32:10	18.1	0.900	16.29
13:32:11	18.1	0.900	16.29
13:32:12	18.1	0.901	16.31
13:32:13	18.1	0.901	16.31
13:32:14	18.1	0.901	16.31
13:32:15	18.1	0.901	16.31
13:32:16	18.1	0.899	16.27
13:32:17	18.1	0.901	16.31
13:32:18	18.1	0.895	16.20
13:32:19	18.1	0.900	16.29
13:32:20	18	1.000	18.00
13:32:21	18	0.999	17.98
13:32:22	18	1.000	18.00
13:32:23	18	1.002	18.04
13:32:24	17.9	1.001	17.92
13:32:25	18	1.002	18.04
13:32:26	17.9	1.005	17.99
13:32:27	18	0.999	17.98
13:32:28	18	0.999	17.98
13:32:29	18	0.999	17.98
13:32:30	18	0.999	17.98
13:32:31	18	0.999	17.98
13:32:32	18	0.999	17.98
13:32:33	18	0.999	17.98
13:32:34	18	0.999	17.98
13:32:35	18	0.999	17.98
13:32:36	18	0.999	17.98
13:32:37	18	0.999	17.98
13:32:38	18	1.002	18.04

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:32:40	17.8	1.098	19.54
13:32:41	17.8	1.104	19.65
13:32:42	17.8	1.103	19.63
13:32:43	17.8	1.098	19.54
13:32:44	17.8	1.098	19.54
13:32:45	17.8	1.099	19.56
13:32:46	17.8	1.100	19.58
13:32:47	17.8	1.103	19.63
13:32:48	17.8	1.098	19.54
13:32:49	17.8	1.099	19.56
13:32:50	17.8	1.098	19.54
13:32:51	17.8	1.103	19.63
13:32:52	17.8	1.104	19.65
13:32:53	17.8	1.099	19.56
13:32:54	17.8	1.098	19.54
13:32:55	17.8	1.104	19.65
13:32:56	17.8	1.100	19.58
13:32:57	17.8	1.102	19.62
13:32:58	17.8	1.100	19.58
13:32:59	17.8	1.098	19.54
13:33:00	17.8	1.099	19.56
13:33:01	17.6	1.198	21.08
13:33:02	17.6	1.199	21.10
13:33:03	17.6	1.197	21.07
13:33:04	17.6	1.198	21.08
13:33:05	17.6	1.203	21.17
13:33:06	17.6	1.203	21.17
13:33:07	17.6	1.202	21.16
13:33:08	17.6	1.203	21.17

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:33:09	17.6	1.199	21.10
13:33:10	17.6	1.203	21.17
13:33:11	17.6	1.202	21.16
13:33:12	17.6	1.200	21.12
13:33:13	17.6	1.199	21.10
13:33:14	17.7	1.197	21.19
13:33:15	17.7	1.197	21.19
13:33:16	17.7	1.200	21.24
13:33:17	17.7	1.202	21.28
13:33:18	17.6	1.203	21.17
13:33:19	17.7	1.202	21.28
13:33:21	17.5	1.301	22.77
13:33:22	17.5	1.301	22.77
13:33:23	17.5	1.301	22.77
13:33:24	17.5	1.302	22.79
13:33:25	17.5	1.301	22.77
13:33:26	17.5	1.301	22.77
13:33:27	17.5	1.301	22.77
13:33:28	17.5	1.299	22.73
13:33:29	17.5	1.301	22.77
13:33:30	17.5	1.301	22.77
13:33:31	17.5	1.301	22.77
13:33:32	17.5	1.301	22.77
13:33:33	17.5	1.301	22.77
13:33:34	17.5	1.299	22.73
13:33:35	17.5	1.301	22.77
13:33:36	17.5	1.301	22.77
13:33:37	17.5	1.301	22.77
13:33:38	17.5	1.301	22.77

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:33:39	17.5	1.301	22.77
13:33:40	17.5	1.299	22.73
13:33:41	17.5	1.301	22.77
13:33:42	17.3	1.405	24.31
13:33:43	17.3	1.400	24.22
13:33:44	17.3	1.400	24.22
13:33:45	17.3	1.400	24.22
13:33:46	17.3	1.400	24.22
13:33:47	17.3	1.400	24.22
13:33:48	17.3	1.400	24.22
13:33:49	17.3	1.400	24.22
13:33:50	17.3	1.400	24.22
13:33:51	17.3	1.400	24.22
13:33:52	17.3	1.399	24.20
13:33:53	17.3	1.406	24.32
13:33:54	17.3	1.400	24.22
13:33:55	17.3	1.400	24.22
13:33:56	17.3	1.400	24.22
13:33:57	17.3	1.404	24.29
13:33:58	17.3	1.400	24.22
13:33:59	17.3	1.403	24.27
13:34:00	17.3	1.400	24.22
13:34:01	17.3	1.402	24.25
13:34:02	17.1	1.504	25.72
13:34:03	17.1	1.504	25.72
13:34:04	17.1	1.502	25.68
13:34:05	17.1	1.499	25.63
13:34:06	17.1	1.499	25.63
13:34:07	17.1	1.499	25.63

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:34:08	17.1	1.499	25.63
13:34:09	17.1	1.504	25.72
13:34:10	17.2	1.499	25.78
13:34:11	17.2	1.499	25.78
13:34:12	17.2	1.498	25.77
13:34:13	17.2	1.499	25.78
13:34:14	17.2	1.498	25.77
13:34:15	17.2	1.503	25.85
13:34:16	17.2	1.500	25.80
13:34:17	17.2	1.499	25.78
13:34:18	17.2	1.500	25.80
13:34:19	17.2	1.498	25.77
13:34:20	17.2	1.498	25.77
13:34:21	17.2	1.502	25.83
13:34:22	16.9	1.602	27.07
13:34:23	16.9	1.601	27.06
13:34:24	16.9	1.603	27.09
13:34:25	16.9	1.600	27.04
13:34:26	16.9	1.598	27.01
13:34:27	16.9	1.602	27.07
13:34:28	16.9	1.601	27.06
13:34:29	16.9	1.599	27.02
13:34:30	16.9	1.601	27.06
13:34:31	16.9	1.602	27.07
13:34:32	16.9	1.600	27.04
13:34:33	16.9	1.602	27.07
13:34:34	16.9	1.600	27.04
13:34:35	16.9	1.598	27.01
13:34:36	16.9	1.602	27.07

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:34:37	16.9	1.601	27.06
13:34:38	16.9	1.599	27.02
13:34:39	16.9	1.597	26.99
13:34:40	16.9	1.601	27.06
13:34:41	16.9	1.603	27.09
13:34:42	16.7	1.701	28.41
13:34:43	16.7	1.699	28.37
13:34:44	16.7	1.702	28.42
13:34:45	16.7	1.701	28.41
13:34:46	16.7	1.700	28.39
13:34:47	16.7	1.702	28.42
13:34:48	16.7	1.699	28.37
13:34:49	16.7	1.702	28.42
13:34:50	16.7	1.699	28.37
13:34:51	16.7	1.700	28.39
13:34:52	16.7	1.702	28.42
13:34:53	16.7	1.696	28.32
13:34:54	16.7	1.700	28.39
13:34:55	16.7	1.701	28.41
13:34:56	16.7	1.699	28.37
13:34:57	16.7	1.702	28.42
13:34:58	16.7	1.702	28.42
13:34:59	16.7	1.702	28.42
13:35:00	16.7	1.697	28.34
13:35:01	16.7	1.699	28.37
13:35:02	16.4	1.804	29.59
13:35:03	16.4	1.801	29.54
13:35:04	16.4	1.800	29.52
13:35:05	16.4	1.800	29.52

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:35:06	16.4	1.801	29.54
13:35:07	16.4	1.800	29.52
13:35:08	16.4	1.800	29.52
13:35:09	16.4	1.800	29.52
13:35:10	16.4	1.800	29.52
13:35:11	16.4	1.800	29.52
13:35:12	16.4	1.800	29.52
13:35:13	16.4	1.800	29.52
13:35:14	16.4	1.800	29.52
13:35:15	16.4	1.800	29.52
13:35:16	16.4	1.800	29.52
13:35:17	16.4	1.804	29.59
13:35:18	16.4	1.800	29.52
13:35:19	16.4	1.800	29.52
13:35:20	16.4	1.800	29.52
13:35:21	16.4	1.801	29.54
13:35:22	16.1	1.904	30.65
13:35:23	16.1	1.904	30.65
13:35:24	16.1	1.905	30.67
13:35:25	16.1	1.904	30.65
13:35:26	16.1	1.899	30.57
13:35:27	16.1	1.898	30.56
13:35:28	16.1	1.904	30.65
13:35:29	16.1	1.901	30.61
13:35:30	16.1	1.899	30.57
13:35:31	16.1	1.903	30.64
13:35:32	16.1	1.904	30.65
13:35:33	16.1	1.899	30.57
13:35:34	16.1	1.899	30.57

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:35:35	16.1	1.903	30.64
13:35:36	16.1	1.904	30.65
13:35:37	16.1	1.898	30.56
13:35:38	16.1	1.901	30.61
13:35:39	16.1	1.899	30.57
13:35:40	16.1	1.903	30.64
13:35:41	16.1	1.904	30.65
13:35:42	16.1	1.899	30.57
13:35:43	15.8	1.994	31.51
13:35:44	15.8	1.997	31.55
13:35:45	15.8	1.998	31.57
13:35:46	15.8	2.000	31.60
13:35:47	15.7	2.003	31.45
13:35:48	15.7	2.003	31.45
13:35:49	15.8	2.003	31.65
13:35:50	15.7	2.003	31.45
13:35:51	15.8	1.998	31.57
13:35:52	15.8	1.999	31.58
13:35:53	15.8	1.998	31.57
13:35:54	15.8	1.997	31.55
13:35:55	15.8	1.998	31.57
13:35:56	15.8	2.001	31.62
13:35:57	15.8	1.998	31.57
13:35:58	15.8	1.997	31.55
13:35:59	15.8	1.997	31.55
13:36:00	15.8	2.002	31.63
13:36:01	15.8	2.003	31.65
13:36:02	15.4	2.094	32.25
13:36:03	15.3	2.102	32.16

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:36:04	15.3	2.097	32.08
13:36:05	15.3	2.102	32.16
13:36:06	15.3	2.101	32.15
13:36:07	15.3	2.102	32.16
13:36:08	15.3	2.099	32.11
13:36:09	15.3	2.101	32.15
13:36:10	15.3	2.102	32.16
13:36:11	15.3	2.101	32.15
13:36:12	15.3	2.102	32.16
13:36:13	15.3	2.100	32.13
13:36:14	15.3	2.101	32.15
13:36:15	15.3	2.101	32.15
13:36:16	15.3	2.102	32.16
13:36:17	15.3	2.102	32.16
13:36:18	15.3	2.100	32.13
13:36:19	15.3	2.101	32.15
13:36:20	15.3	2.101	32.15
13:36:21	15.3	2.102	32.16
13:36:22	14.7	2.205	32.41
13:36:23	14.7	2.200	32.34
13:36:24	14.7	2.200	32.34
13:36:25	14.7	2.200	32.34
13:36:26	14.7	2.200	32.34
13:36:27	14.7	2.200	32.34
13:36:28	14.7	2.200	32.34
13:36:29	14.7	2.200	32.34
13:36:30	14.7	2.200	32.34
13:36:31	14.7	2.200	32.34
13:36:32	14.7	2.200	32.34

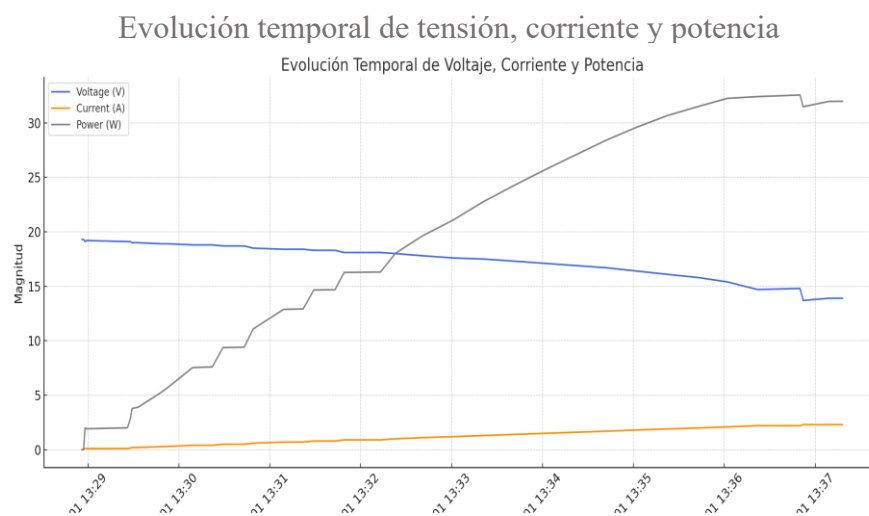
Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:36:33	14.7	2.200	32.34
13:36:34	14.8	2.200	32.56
13:36:35	14.7	2.206	32.43
13:36:36	14.7	2.200	32.34
13:36:37	14.7	2.202	32.37
13:36:38	14.7	2.201	32.35
13:36:39	14.7	2.203	32.38
13:36:40	14.7	2.199	32.33
13:36:41	14.7	2.199	32.33
13:36:42	14.7	2.199	32.33
13:36:43	14.7	2.199	32.33
13:36:44	14.7	2.199	32.33
13:36:45	14.7	2.199	32.33
13:36:46	14.7	2.199	32.33
13:36:47	14.7	2.199	32.33
13:36:48	14.7	2.199	32.33
13:36:49	14.7	2.203	32.38
13:36:50	14.8	2.200	32.56
13:36:51	14.7	2.199	32.33
13:36:52	13.7	2.298	31.48
13:36:53	13.8	2.298	31.71
13:36:54	13.7	2.299	31.50
13:36:55	13.7	2.298	31.48
13:36:56	13.7	2.303	31.55
13:36:57	13.7	2.301	31.52
13:36:58	13.7	2.299	31.50
13:37:00	13.7	2.298	31.48
13:37:00	13.8	2.302	31.77
13:37:01	13.7	2.303	31.55

Time	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
13:37:02	13.8	2.303	31.78
13:37:03	13.8	2.303	31.78
13:37:04	13.8	2.301	31.75
13:37:06	13.8	2.299	31.73
13:37:06	13.8	2.297	31.70
13:37:07	13.8	2.299	31.73
13:37:08	13.8	2.298	31.71
13:37:09	13.9	2.300	31.97
13:37:10	13.8	2.300	31.74
13:37:11	13.8	2.301	31.75
13:37:12	13.8	2.300	31.74
13:37:13	13.8	2.301	31.75
13:37:14	13.8	2.300	31.74
13:37:15	13.8	2.305	31.81
13:37:16	13.8	2.302	31.77
13:37:17	13.8	2.300	31.74
13:37:18	13.9	2.301	31.98
13:37:19	13.8	2.300	31.74
13:37:21	13.8	2.303	31.78
13:37:21	13.8	2.302	31.77
13:37:23	19.1	0.581	11.10
13:37:24	19.4	0.000	0.00
13:37:25	19.4	0.000	0.00

Nota. Muestra los datos obtenidos en las pruebas de carga al panel solar policristalino, detallando los parámetros eléctricos medidos bajo condiciones reales de operación.

Figura 13:

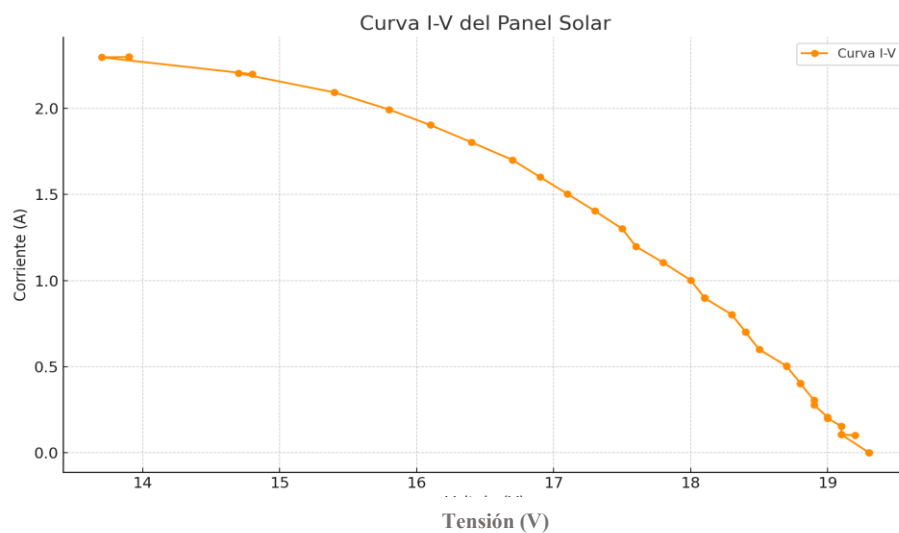
Evolución temporal en parámetros eléctricos de panel Policristalino



Nota. Comportamiento temporal de tensión, corriente y potencia bajo carga progresiva.

Figura 14:

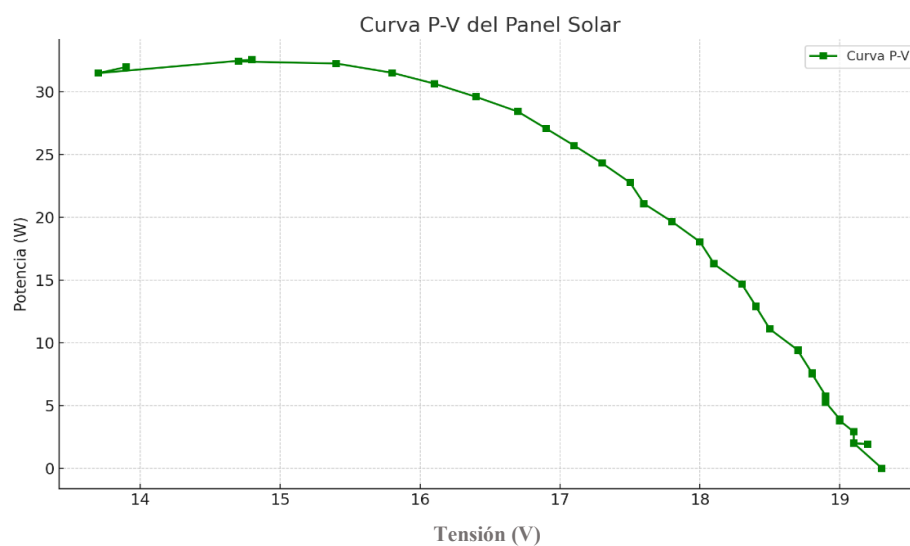
Curva característica de corriente contra tensión (I-V) – Panel Policristalino



Nota. Curva característica que describe la relación entre tensión y corriente bajo condiciones reales.

Figura 15:

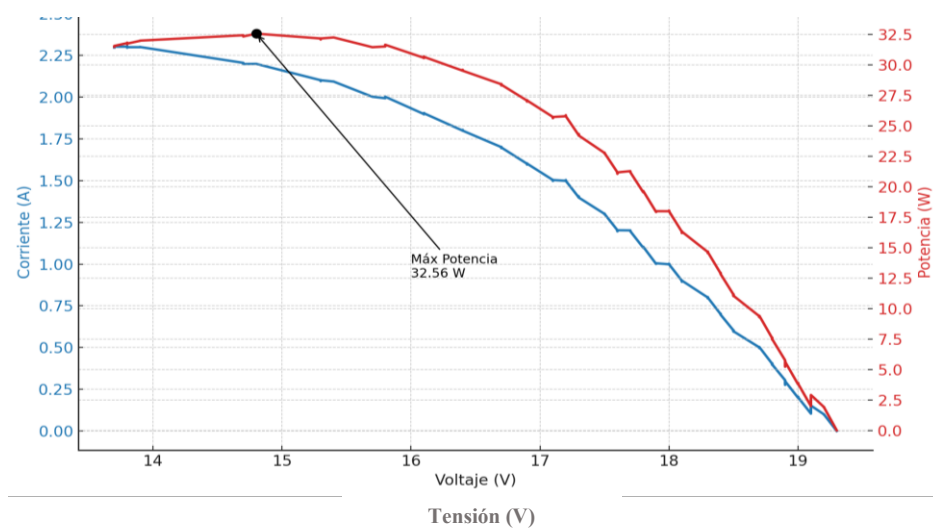
Curva P-V del Panel Solar Policristalino



Nota. Variación de la potencia respecto al tensión, con identificación del punto de máxima eficiencia.

Figura 16:

Curva de I-V-P Panel Policristalino 50W. (22 de marzo 2025)



Nota. Gráfica compuesta de corriente y potencia frente a tensión, con el MPP resaltado.

6. Análisis de Resultados (Revisado con Corrección por Temperatura)

El valor de eficiencia en campo fue del 11.15%, mientras que en condiciones estándar (STC) es del 16.71%. Esta diferencia se atribuye a varios factores, entre ellos:

- Elevada temperatura del módulo (62.8 °C) frente a los 25 °C de referencia en STC.
- Irradiancia medida inferior al estándar (954.4 W/m² frente a 1000 W/m²).
- Pérdidas ópticas y eléctricas bajo condiciones reales.

Para cuantificar el efecto de la temperatura, se puede aplicar la corrección por coeficiente térmico. Utilizando un valor típico para paneles policristalinos:

$$\gamma = -0.45\% / ^\circ\text{C} = -0.0045 / ^\circ\text{C}$$

Y considerando la diferencia de temperatura:

$$\Delta T = T_{\text{mod}} - T_{\text{STC}} = 62.8 - 25 = 37.8 ^\circ\text{C}$$

Aplicando la corrección a la eficiencia STC:

$$\eta_{\text{corregida}} = \eta_{\text{STC}} \times [1 + \gamma \times \Delta T] = 16.71\% \times [1 + (-0.0045 \times 37.8)] = 16.71\% \times (0.8299) \approx 13.87\%$$

Esto sugiere que, únicamente por efecto térmico, la eficiencia esperada debería reducirse a aproximadamente 13.87%, lo cual es mayor que la eficiencia real observada (11.15%). La diferencia restante (≈ 2.7 puntos porcentuales) podría atribuirse a:

- Ineficiencias del sistema de medición.
- Pérdidas por reflexión, suciedad o ángulo de incidencia.
- Posible degradación del panel si es de uso prolongado.

Este análisis reafirma la importancia de aplicar una compensación térmica para poder comparar de forma justa la eficiencia en campo con la eficiencia teórica o de catálogo.

El valor de eficiencia en campo fue del 11.15%, mientras que en condiciones STC es del 16.71%. La diferencia se debe a factores como la temperatura elevada del panel (62.8°C),

pérdidas térmicas, desviación de irradiancia respecto al estándar, y condiciones ambientales reales que no corresponden a las condiciones de laboratorio.

7. Conclusiones

- El punto de máxima potencia real se identificó correctamente utilizando el método de carga progresiva.
- La eficiencia real del panel fue inferior a la nominal, lo cual es coherente con el comportamiento térmico y lumínico observado.
- Las gráficas I-V y P-V reflejan adecuadamente el comportamiento típico del panel bajo condiciones controladas.

8. Recomendaciones

- Repetir la prueba con diferentes orientaciones e inclinaciones del panel para verificar impacto angular.
- Realizar pruebas comparativas en distintos horarios para observar la variación diaria.
- Aplicar métodos de corrección térmica para comparar directamente con STC si se requiere validación de catálogo.

9. Registro fotográfico

Figura 17:

Medición de irradiancia durante ensayo al Panel Policristalino



Nota. Valor de irradiancia registrado durante el experimento de carga aplicado al módulo.

Figura 18:

Medidor multímetro solar EL400B (Panel Policristalino)



Nota. Visualización de parámetros eléctricos clave del panel durante la prueba.

Figura 19:

Temperatura °C tomada a panel FV Policristalino (prueba en campo)



Nota. Temperatura registrada en la parte posterior del módulo con termómetro infrarrojo.

Figura 20:

Módulo EGE-50-P36 en conexión directa con carga electrónica



Nota. Panel policristalino de 50 W durante el ensayo de campo, conectado a la carga electrónica programable DL24P. Se evaluó su comportamiento eléctrico bajo condiciones reales mediante carga electrónica.

4.4 Comparación de desempeño

Con el fin de evaluar cuál de los dos tipos de paneles solares presenta un mejor rendimiento bajo condiciones reales de operación, se realizó un análisis comparativo utilizando los principales indicadores eléctricos obtenidos durante las pruebas de campo. Esta comparación se centró en variables como la eficiencia real, la eficiencia corregida por temperatura, la densidad de potencia y el factor de forma (fill factor).

Los resultados comparativos permiten identificar ventajas y desventajas técnicas entre el panel monocristalino y el policristalino, considerando tanto sus valores medidos como sus especificaciones bajo condiciones estándar (STC). Esta evaluación constituye un insumo

clave para validar la aplicabilidad de la metodología y orientar futuras decisiones técnicas sobre selección de módulos fotovoltaicos.

Análisis:

- El panel monocristalino demostró un rendimiento superior en todas las métricas clave, con un **42.8% más de eficiencia relativa** que el policristalino.
- Aunque ambos operaron a temperaturas similares, el monocristalino mostró menor caída térmica.
- La densidad de potencia y el fill factor respaldan su mejor calidad eléctrica.

Esta comparación cuantitativa entre ambos tipos de paneles no solo permite evaluar su rendimiento relativo, sino que también proporciona evidencia concreta sobre la capacidad de la metodología propuesta para identificar diferencias reales de comportamiento entre tecnologías fotovoltaicas en campo. El uso de instrumentos de bajo costo demostró ser suficiente para capturar estas variaciones con alta fidelidad.

4.5 Validación de la Metodología

Los resultados obtenidos permiten validar con éxito la metodología propuesta para medir eficiencia en condiciones reales usando equipamiento accesible. Las diferencias observadas con respecto a los valores STC son coherentes con la teoría sobre pérdidas térmicas y ambientales.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 Validación experimental de la metodología en condiciones reales

En el marco del desarrollo del presente trabajo de graduación titulado: "Investigación, desarrollo y validación de una metodología económica para medir eficiencia y rendimiento de paneles solares monocristalinos y policristalinos en condiciones reales de operación", se planteó como objetivo central la creación y validación de un procedimiento técnico accesible, reproducible y de bajo costo que permita caracterizar el comportamiento real de paneles solares FV bajo irradiancia natural, sin recurrir a instrumentación sofisticada o ambientes controlados de laboratorio.

La necesidad de este enfoque surge del desfase entre los valores de eficiencia proporcionados por los fabricantes de paneles (determinados bajo condiciones STC) y el rendimiento real observado en campo, especialmente en zonas tropicales como El Salvador, donde las condiciones de irradiancia, temperatura y ángulo solar varían considerablemente respecto a los entornos controlados. De ahí la importancia de contar con una metodología económica y técnicamente robusta que permita capturar datos confiables de eficiencia energética, sin depender de equipos de laboratorio de alto costo.

En función de este propósito, se llevaron a cabo pruebas de campo sobre dos paneles de 50W de tecnología diferente (monocristalina y policristalina), utilizando instrumentación cuidadosamente seleccionada por su balance entre precisión y costo. La ejecución de estos experimentos permitió no solo validar la viabilidad de la metodología propuesta, sino también recopilar una base de datos robusta para comparar el desempeño de ambas tecnologías en escenarios reales, con más de 500 mediciones individuales por panel. Este capítulo presenta un resumen detallado de los resultados obtenidos, el análisis de los parámetros eléctricos y ambientales medidos, las tablas comparativas clave y las conclusiones técnicas que surgen a partir de la ejecución experimental, conforme a lo establecido en el anteproyecto aprobado.

5.2 Fundamento y alcance de los experimentos

Tal como se especifica en el documento de anteproyecto, uno de los pilares de esta investigación es la validación práctica de una metodología económica que permita determinar la eficiencia y rendimiento real de paneles solares FV.

La justificación de esta necesidad radica en la amplia brecha existente entre la eficiencia nominal declarada por los fabricantes bajo condiciones STC (Standard Test Conditions) y el comportamiento real de los paneles en ambientes tropicales, donde influyen variables como la temperatura elevada, la irradiancia variable y el envejecimiento del material. La evolución del presente trabajo de graduación permitió desarrollar un protocolo experimental riguroso, totalmente alineado con los objetivos del anteproyecto. Esta validación ha fortalecido el sustento técnico del trabajo, demostrando en la práctica la aplicabilidad de la metodología propuesta y asegurando plena congruencia con el alcance previamente aprobado por la universidad.

5.3 Instrumentación empleada y procedimiento

Se utilizó instrumentación económica pero funcional, detallada en el documento anexo de especificaciones técnicas, entre la cual destacan:

- Multímetro solar EL400B: para detección automática del MPPT, medición de V_{mp} , I_{mp} y V_{oc} .
- Carga electrónica programable DL24: para trazado de curva I-V mediante incrementos controlados de carga.
- Medidor de irradiancia SM206: para cuantificar la potencia solar incidente sobre el área efectiva del panel (en W/m^2).

El procedimiento consistió en exponer ambos paneles durante un periodo de aclimatación térmica, seguido de la recolección de datos en condiciones de irradiancia estable. Se obtuvieron lecturas precisas de P_{max} , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} , I_{sc} [A], temperatura de superficie del panel y área efectiva irradiada.

La Tabla 4 resume de forma estructurada los principales parámetros técnicos utilizados en la caracterización eléctrica de paneles solares fotovoltaicos, junto con sus respectivas fórmulas de cálculo cuando corresponden. Esta recopilación incluye tanto magnitudes eléctricas básicas —como potencia, tensión y corriente en el punto de máxima potencia— como variables derivadas críticas para el análisis comparativo, tales como eficiencia, densidad de potencia e impacto térmico.

Los parámetros presentados permiten evaluar el comportamiento real del módulo bajo condiciones ambientales no controladas, y contrastarlo frente a los valores nominales establecidos en condiciones estándar (STC). Asimismo, se incluyen indicadores clave como el fill factor (FF), el coeficiente térmico y el ajuste por temperatura, los cuales aportan mayor profundidad técnica en la evaluación del rendimiento fotovoltaico.

Esta tabla constituye una guía de referencia para el análisis y procesamiento de datos obtenidos durante los ensayos experimentales, facilitando la trazabilidad y uniformidad de los cálculos aplicados. Su uso resulta esencial para validar comparativamente el desempeño de diferentes tecnologías fotovoltaicas, así como para fundamentar con rigor técnico la formulación de conclusiones dentro del marco metodológico del presente trabajo.

Tabla 4:

Parámetros: descripción técnica y formulación

#	Parámetro	Descripción técnica ampliada	Fórmula (si aplica)
1	Área efectiva (m ²)	Superficie activa del panel bajo irradiación. Esencial para calcular eficiencia y potencia por unidad de superficie.	$A = \text{ancho} \times \text{alto}$
2	P _{max} STC (W)	Potencia máxima bajo condiciones estándar: 1000 W/m ² , 25°C, AM1.5. Proporcionada por el fabricante.	—
3	P _{max} Real (W)	Potencia máxima medida en campo. Muestra el comportamiento energético real.	$P_{\text{max}} = V_{\text{mp}} \times I_{\text{mp}}$

#	Parámetro		Descripción técnica ampliada	Fórmula (si aplica)
4	Vmp (V)		Tensión en el punto de máxima potencia.	—
5	Imp [A]		Corriente en el punto de máxima potencia.	—
6	Densidad (W/m ²)	STC	Potencia STC dividida por el área.	$D_STC = P_STC / Area$
7	Densidad (W/m ²)	Real	Potencia real dividida por el área.	$D_real = P_real / Area$
8	Irradiancia (W/m ²)	Real	Radiación solar medida durante el experimento.	—
9	Temperatura del panel (°C)		Influye directamente en el rendimiento eléctrico del módulo.	—
10	Eficiencia STC (%)		Relación entre Pmax STC e irradiancia teórica.	$\eta_STC = (P_STC / (1000 \times Area)) \times 100$
11	Eficiencia Real (%)		Relación entre Pmax real e irradiancia real.	$\eta_real = (P_real / (G \times Area)) \times 100$
12	Eficiencia Corregida T (°C)		Eficiencia ajustada considerando solo temperatura.	$\eta_corr = \eta_STC \times [1 + (\gamma \times \Delta T)]$
13	Δ Eficiencia STC - Real (%)		Diferencia entre eficiencia ideal y real.	$\Delta\eta = \eta_STC - \eta_real$
14	Coef. Térmico γ (%/°C)		Afecta negativamente la eficiencia. Valor negativo.	Típico: $-0.0045/^{\circ}C$
15	Hora del ensayo		Referencia para interpretar la irradiancia y temperatura.	—
16	Fill Factor (FF)		Relación entre Pmax y Voc $\times$ Isc [A]. Mide calidad eléctrica.	$FF = (Vmp \times Imp) / (Voc \times Isc [A])$

Nota. Contiene la descripción técnica de los parámetros eléctricos fundamentales y sus respectivas fórmulas para la evaluación de paneles solares.

5.4 Resultados experimentales y análisis comparativo

A continuación, se presenta la Tabla Comparativa Extendida con los valores reales obtenidos en las pruebas de campo del 22 de marzo de 2025 para ambos tipos de panel solar:

La Tabla 5 presenta los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de campo realizadas el 22 de marzo de 2025, organizados en un formato comparativo entre los paneles solares monocristalino y policristalino. Esta tabla integra los principales parámetros eléctricos y térmicos medidos y calculados, con base en la metodología planteada, lo que

permite evaluar el rendimiento real de ambos módulos bajo condiciones ambientales similares.

A partir de los datos, se evidencia que el panel monocristalino alcanzó una potencia máxima real de 37.37 W, frente a 31.84 W del policristalino, lo que se traduce en una mayor densidad energética real (148.36 W/m^2 vs. 106.39 W/m^2), incluso considerando que ambos fueron evaluados bajo niveles de irradiancia equivalentes. Esta diferencia se acentúa al calcular la eficiencia corregida, que contempla el efecto de la temperatura sobre el rendimiento: 16.54% para el monocristalino, frente a 13.87% en el policristalino.

El Fill Factor (FF), indicador de calidad del módulo, también favorece al panel monocristalino (0.666) frente al policristalino (0.654), lo que reafirma su superioridad en términos de aprovechamiento energético. Si bien ambos paneles mostraron una reducción respecto a su eficiencia ideal (STC), el monocristalino logró mantener un comportamiento más estable frente al incremento térmico, gracias a su mejor tolerancia a temperaturas elevadas (coef. térmico $\gamma \approx -0.45\%/^{\circ}\text{C}$).

En conjunto, esta tabla consolida el análisis cuantitativo que respalda la elección de la tecnología monocristalina como opción más eficiente y robusta, no necesariamente por su menor costo por watt, sino por su mayor densidad de potencia, menor degradación térmica y mejor relación entre área activa y energía útil generada en condiciones reales de operación.

Tabla 5:

Resultados experimentales y análisis comparativo

Parámetro	Monocristalino	Policristalino
Área efectiva (m^2)	0.2519	0.2993
P _{max} STC (W)	50.00	50.00
P _{max} Real (W)	37.37	31.84
V _{mp} [V]	17.00	14.81
I _{mp} (A)	2.20	2.15

Parámetro	Monocrystalino	Policristalino
Densidad STC (W/m²)	198.43	167.08
Densidad Real (W/m²)	148.36	106.39
Irradiancia Real (W/m²)	931.6	954.4
Temperatura del panel (°C)	62.0	62.8
Eficiencia STC (%)	19.85	16.71
Eficiencia Real (%)	15.92	11.15
Eficiencia Corregida Temp (%)	16.54	13.87
Δ Eficiencia STC - Real (%)	3.93	5.56
Coef. Térmico γ (%/°C)	-0.45	-0.45
Hora del ensayo	14:05:52	13:28:56
Fill Factor (FF)	0.666	0.654

Nota. Resume los resultados experimentales obtenidos para los paneles monocrystalino y policristalino, permitiendo una comparación directa de su desempeño bajo condiciones reales.

5.5 Conclusiones basadas en resultados comparativos

1. Superioridad del panel monocrystalino en condiciones reales:

Los resultados de eficiencia real muestran un desempeño consistentemente superior del panel monocrystalino frente al policristalino (15.92% vs. 11.15%). Esto representa un incremento del 42.8% en eficiencia relativa, lo que lo convierte en la opción más eficaz cuando se requiere máxima generación energética en espacios reducidos.

2. Menores pérdidas térmicas en la tecnología monocrystalina:

Aunque ambos paneles operaron a temperaturas similares (~62 °C), el panel monocrystalino mostró una menor caída relativa de eficiencia respecto a su valor STC. Esto indica una mejor tolerancia térmica atribuida a la calidad de sus celdas de grado A y menor resistencia serie interna.

3. Mayor densidad de potencia en el monocristalino:

El panel monocristalino alcanzó una densidad de potencia de 148.36 W/m² frente a 106.39 W/m² del panel policristalino. Esta métrica es clave para evaluar el rendimiento cuando la disponibilidad de superficie es un factor limitante.

4. Fill Factor como indicador de calidad de fabricación:

Ambos paneles mostraron fill factors aceptables (>0.65), pero el monocristalino (0.666) evidenció un menor nivel de pérdidas internas respecto al policristalino (0.654). Este parámetro avala la integridad eléctrica del módulo y su eficiencia de conversión.

5. Impacto directo de la irradiancia y temperatura ambiental:

Las mediciones demostraron que la eficiencia real depende de forma crítica del entorno. Esto justifica plenamente la necesidad de contar con una metodología validada en campo, tal como se plantea en esta investigación.

6. Viabilidad del método con instrumentación económica:

La totalidad de los datos fue obtenida con instrumentos de bajo costo, pero con calibración y procedimiento adecuados. Esto valida la propuesta metodológica del trabajo y respalda su replicabilidad en escenarios académicos y técnicos.

5.6 Análisis comparativo con la literatura especializada y recomendación tecnológica

Con base en los resultados obtenidos en campo, y considerando la necesidad de contextualizar técnicamente los hallazgos, a continuación, se realiza un análisis comparativo entre las tecnologías fotovoltaicas evaluadas y lo reportado en la literatura especializada, con el fin de establecer recomendaciones específicas para El Salvador.

El clima tropical de El Salvador se caracteriza por altos niveles de irradiancia solar y elevadas temperaturas, lo cual impone desafíos técnicos importantes para las tecnologías fotovoltaicas. En este entorno, los paneles solares monocristalinos han demostrado un rendimiento superior en términos de eficiencia de conversión energética, la cual suele oscilar entre el 15 % y el 22 %, frente al 13 %–16 % de los paneles policristalinos (Naturgy, s.f.). Esta diferencia se

traduce en una mayor producción energética por metro cuadrado, un aspecto especialmente relevante en instalaciones con espacio reducido.

Los monocristalinos también presentan mejores propiedades térmicas, ya que poseen coeficientes de temperatura más bajos, lo que implica una menor pérdida de potencia con el aumento de temperatura (Damia Solar, s.f.). Estas características los hacen más adecuados para operar en regiones cálidas como El Salvador, donde la eficiencia energética bajo estrés térmico es crucial. Además, mantienen un mejor comportamiento ante irradiancia baja o difusa, como en días nublados o durante las primeras y últimas horas del día (Damia Solar, s.f.).

No obstante, algunos estudios en zonas áridas han reportado resultados más matizados. Por ejemplo, se ha observado que, bajo irradiación solar extremadamente intensa, un panel policristalino podría experimentar una pérdida porcentual de potencia ligeramente menor (~14 %) comparado con un monocristalino (~16 %). Sin embargo, en condiciones de irradiancia baja, el monocristalino mantuvo una caída mucho menor (9 %) frente al 21 % del policristalino (Mekki et al., 2023), reforzando así su desempeño más estable ante variabilidad lumínica.

Aspectos económicos y viabilidad de la inversión

Desde el punto de vista económico, los paneles monocristalinos implican una inversión inicial más elevada, debido al uso de silicio de alta pureza y a su proceso de fabricación más complejo (Naturgy, s.f.). Sin embargo, esta diferencia de costo suele verse compensada por la mayor eficiencia y vida útil del equipo. Estudios de mercado destacan que la producción acumulada durante más de 25 años de servicio permite a los monocristalinos ofrecer un retorno económico superior (Damia Solar, s.f.).

Además, su mayor densidad energética reduce la necesidad de espacio y soportes estructurales, lo que se traduce en ahorros en costos de instalación (Damia Solar, s.f.). Este aspecto es clave en contextos como El Salvador, donde muchas viviendas y edificios disponen de superficies limitadas para la colocación de módulos. Por el contrario, los paneles

policristalinos, al tener un menor costo unitario por watt, pueden ser una opción válida en proyectos de gran escala o con presupuestos muy limitados, siempre que el espacio disponible no sea una limitante crítica (Naturgy, s.f.).

En síntesis, para instalaciones residenciales, educativas o comunitarias en El Salvador, donde el espacio, el calor y la eficiencia son factores determinantes, los paneles monocristalinos representan una solución más robusta y rentable. Su capacidad para mantener un rendimiento estable bajo irradiancia variable y temperaturas elevadas, junto a un mayor aprovechamiento del espacio disponible, los posiciona como la alternativa más adecuada en términos técnico-económicos para el contexto nacional.

5.7 Conclusiones generales

La implementación de la metodología propuesta ha demostrado ser efectiva, confiable y económicamente viable para evaluar en campo la eficiencia energética real de tecnologías fotovoltaicas bajo condiciones ambientales naturales. A través de la aplicación de procedimientos rigurosos y el uso de instrumentación accesible, se logró obtener una caracterización profunda de dos tipos de paneles solares de 50W: uno monocristalino y otro policristalino.

Los resultados experimentales validan que el panel monocristalino presenta un desempeño superior en todas las métricas críticas: eficiencia real, densidad de potencia, tolerancia térmica y factor de llenado. No obstante, el policristalino se mantiene como una opción funcional en condiciones menos exigentes o cuando la economía de escala lo permite. Esta evidencia empírica sostiene con solidez la tesis del trabajo de graduación: es posible desarrollar una metodología económica y técnicamente robusta para la medición del rendimiento de paneles solares en condiciones reales de operación. Dicha conclusión no solo responde a los objetivos del anteproyecto, sino que los trasciende al demostrar que esta metodología puede ser empleada por técnicos, estudiantes y profesionales para evaluaciones precisas sin necesidad de laboratorios especializados.

El enfoque propuesto plantea un cambio de paradigma: descentralizar la caracterización fotovoltaica y ponerla al alcance de más actores, promoviendo decisiones energéticas informadas, sostenibles y contextualizadas, demostrando así, que la eficiencia energética también puede medirse desde el campo, con precisión, criterio y bajo costo.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones

Luego de desarrollar y validar la metodología económica propuesta para medir la eficiencia y el rendimiento de paneles solares fotovoltaicos en condiciones reales de operación, se concluye lo siguiente:

- La metodología desarrollada demostró ser efectiva, accesible y replicable, permitiendo la evaluación de eficiencia fotovoltaica en campo mediante el uso de instrumentos de bajo costo (SM206, EL400B, DL24), sin requerir laboratorios especializados ni equipos de gama alta.
- Se comprobó empíricamente la pérdida de eficiencia bajo condiciones reales de operación. Ambos paneles, monocristalino y policristalino, presentaron reducciones en su eficiencia (η) respecto a los valores estándar bajo condiciones STC (Standard Test Conditions), debido principalmente a:
 - Elevadas temperaturas de operación ($T > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).
 - Irradiancia solar inferior a los $1\,000\text{ W/m}^2$ de referencia.
 - Pérdidas ópticas ocasionadas por suciedad, sombras parciales e inclinación subóptima.
- El panel monocristalino mostró un desempeño superior al policristalino. Con una eficiencia real de $\eta = 15.92\%$ frente a $\eta = 11.15\%$, el panel monocristalino resultó ser aproximadamente un 42.8% más eficiente en condiciones reales, lo que valida su mayor densidad energética y estabilidad térmica en climas tropicales.
- Las curvas I–V y P–V obtenidas fueron consistentes con la teoría fotovoltaica. La forma de las curvas permitió identificar claramente el punto de máxima potencia (P_{MPP}), evaluado como el producto entre la tensión (V) y la corriente (I) en el punto de operación óptimo del módulo.
- La corrección térmica resultó esencial para comparar datos reales con condiciones STC. Al aplicar el coeficiente de temperatura sobre la tensión (V), se obtuvo una mejor aproximación del comportamiento ideal del panel, lo que incrementa la validez técnica de las mediciones realizadas en campo.

6.2 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y la experiencia acumulada durante el desarrollo del presente trabajo, se sugieren a continuación una serie de recomendaciones orientadas a ampliar y fortalecer futuras investigaciones relacionadas con la evaluación de módulos fotovoltaicos mediante metodologías accesibles:

1. Profundización de la metodología utilizada: Se recomienda considerar la incorporación de sensores adicionales para medir variables como temperatura ambiente, temperatura del módulo, humedad relativa y velocidad del viento, lo cual permitiría analizar con mayor precisión el efecto de estas condiciones sobre el desempeño eléctrico de los módulos. Asimismo, sería conveniente automatizar el proceso de registro de datos utilizando microcontroladores o sistemas de adquisición portátiles, lo que facilitaría una recolección más continua y precisa de la información. También puede explorarse la aplicación de algoritmos de corrección térmica en tiempo real, con el objetivo de ajustar los parámetros medidos a condiciones cercanas a las de prueba estándar (STC).
2. Ampliación del conjunto de pruebas: Para validar la aplicabilidad de la metodología en una gama más amplia de tecnologías, se sugiere incluir módulos fotovoltaicos de tipo bifacial, PERC, Thin-Film u otras tecnologías disponibles en el mercado local. Igualmente, sería valioso realizar pruebas utilizando paneles de mayor potencia (100 W, 250 W o 500 W), así como analizar el comportamiento de pequeños arreglos conectados en serie o paralelo, lo que permitiría extender los resultados hacia aplicaciones prácticas más complejas.
3. Diversificación de contextos de aplicación: Dado que las condiciones ambientales influyen directamente en el rendimiento de los módulos, se recomienda aplicar esta misma metodología en otras regiones del país que presenten diferentes altitudes, niveles de nubosidad o humedad. Asimismo, desarrollar pruebas distribuidas a lo largo del año podría aportar una visión más completa del comportamiento estacional de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de operación. A largo plazo, también sería pertinente establecer un monitoreo periódico para evaluar posibles pérdidas de rendimiento por degradación de los módulos.
4. Integración de análisis económico y educativo: Sería oportuno complementar los análisis técnicos con evaluaciones de costo-beneficio, considerando el costo por watt instalado,

el tiempo estimado de recuperación de inversión y el impacto de la eficiencia sobre la generación acumulada. Esta perspectiva permitiría orientar decisiones tanto técnicas como económicas en proyectos de pequeña y mediana escala. Finalmente, se recomienda sistematizar la metodología empleada para facilitar su implementación como herramienta didáctica en entornos académicos, y considerar la creación de un repositorio de datos que pueda servir de base para futuras investigaciones.

CRONOGRAMA DE TRABAJO

		2024				2025																
		DIC	ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO			
No.	Descripción de la actividad	SEM-4	SEM-1	SEM-2	SEM-3	SEM-4	SEM-1	SEM-2	SEM-3	SEM-4	SEM-1	SEM-2	SEM-3	SEM-4	SEM-1	SEM-2	SEM-3	SEM-4	SEM-1	SEM-2	SEM-3	SEM-4
1	Revisión 1: Anteproyecto																					
2	Presentación del Anteproyecto a la UTLA																					
3	Aprobación del Anteproyecto																					
4	Compra de instrumentación de medición y paneles solares FV																					
5	Inicio del trabajo de graduación																					
6	Revisión 2: Avance No.1 del trabajo de graduacion																					
7	Fabricacion del sistema de montaje de paneles FV																					
8	Recolección de datos en el sistema (presencial en la UTLA)																					
9	Revision 3: Avance No. 2 del trabajo de graduacion con resultados de medición en campo																					
10	Revision 4: Avance No. 3 del trabajo de graduacion Incorporacion de observaciones																					
11	Revision 5: Finalizacion del trabajo de graduacion																					
12	Entrega de trabajo de graduacion a la UTLA y aprobación del mismo																					
13	Entrega de cuatro copias a la UTLA																					
14	Revisión 6: Presentación de defensa del trabajo de graduacion al asesor																					
15	Defensa del Trabajo																					
16	Fin del Proceso																					

TRABAJO DE GRADUACION:

"INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA ECONÓMICA PARA MEDIR EFICIENCIA Y RENDIMIENTO DE PANELES SOLARES MONOCRISTALINOS Y POLICRISTALINOS EN CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN".

BIBLIOGRAFÍA.

Cusa, J. de. (2001). *Energía solar para viviendas*. Grupo Editorial CEAC.

Damia Solar. (s.f.). *Comparativa entre paneles solares monocristalinos frente a paneles solares policristalinos*. <https://www.damiasolar.com/blog/comparativa-entre-paneles-solares-monocristalinos-frente-a-paneles-solares-policristalinos/>

Departamento de Física, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador. (2002). *Energía solar disponible en El Salvador: Proyecto especial de solarimetría*. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Cuenta Mar del Plata.

IRENA. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2023/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2023>

Jingsun Power. (2021). *Figura de curvas de corriente, potencia y voltaje de celda fotovoltaica*.

Komp, R. J. (2001). *Practical photovoltaics: Electricity from solar cells* (3rd ed., revised). Aatec Publications.

Markvart, T. (Ed.). (2000). *Solar electricity* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Mekki, H., et al. (2023). Evaluation of the performance of polycrystalline and monocrystalline PV technologies in a hot and arid region: An experimental analysis. *Sustainability*, 15(20), 14831. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/14831>

Mendoza, L., Ramírez, J., & Torres, A. (2021). Retos en el mantenimiento de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales de América Latina: Un estudio de caso en el Triángulo Norte. *Revista Latinoamericana de Energía Sostenible*, 8(2), 45–59.

Morillo de Escobar, E. (1998). *Energía solar aplicada*. EDUCA.

Morillo de Escobar, E., Hernández, M., & Martínez, M. R. (s.f.). *Energía solar: Celdas solares*. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y

Matemática, Escuela de Física, Departamento de Estado Sólido y Fuentes Renovables de Energía.

Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.

Naturgy. (s.f.). *Diferencia entre monocristalino y policristalino*.

<https://www.naturgy.es/blog/hogar/diferencia-monocristalino-policristalino>

Pareja Aparicio, M. (2010). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo.

Röbke-Doerr, P. (2000). *Energía solar: Construcción y montaje de equipos para aplicaciones eléctricas* (L. Mañas, Trad.). Grupo Editorial CEAC. (Trabajo original publicado como *Solar Strom Anlagen bauen und installieren*)

Sánchez Maza, M. Á. (2008). *Energía solar fotovoltaica*. Limusa, Innovación y Cualificación.

ANEXOS.

Anexo 1: Presupuesto

Descripción	Costo (USD)
SM206 Solar Power Meter	\$135.0
Solar Panel Tester 400W	\$120.0
MakerHawk Battery Load Tester	\$105.0
Panel Monocristalino (50W)	\$60.0
Panel Policristalino (50W)	\$60.0
Materiales de instalación de paneles solares	\$375.0
Imprevistos, contingencia	\$86.0
Total	\$941.0

Anexo 2: Comparación técnica y económica de tecnologías fotovoltaicas disponibles

Tecnología	Eficiencia estándar	Costo estimado por panel (~300 W)	Costo (\$/Watt)	Clasificación (\$/Watt)	Descripción
Policristalino	15%-18%	\$120-\$250 USD	\$0.40-\$0.83	1	Paneles tradicionales compuestos de múltiples cristales de silicio, más económicos, pero menos eficientes que los monocristalinos.
Monocristalino	18%-22%	\$150-\$300 USD	\$0.50-\$1.00	2	Paneles de alta eficiencia fabricados con un único cristal de silicio, ideales para espacios reducidos.
Amorfos (thin-film)	7%-10%	\$100-\$200 USD	\$0.33-\$0.67	3	Paneles flexibles y ligeros, menos eficientes, pero funcionan bien en condiciones de baja luz.
Híbridos PV-T	20%-25% (eléctrica + térmica)	\$800-\$1,200 USD	\$2.67-\$4.00	4	Paneles que combinan generación eléctrica y captación de calor para usos térmicos, maximizando el aprovechamiento energético.
Termoeléctricos	20%-25% (eléctrica + térmica)	\$2,000+ USD	\$6.67+	5	Incorporan módulos termoeléctricos que convierten el calor residual en energía eléctrica adicional mediante el efecto Seebeck.

Tecnología	Eficiencia estándar	Costo estimado por panel (~300 W)	Costo (\$/Watt)	Clasificación (\$/Watt)	Descripción
Celdas Termo Fotovoltaicas	10%-15% (actual), 20% (futuro)	No comercialmente disponibles	N/A	N/A	Utilizan radiación térmica (infrarroja) para generar electricidad mediante celdas avanzadas; en desarrollo experimental.

Anexo 3: Fichas de equipo de instrumentos



Roll over image to zoom in

Solar Panel Tester 400W - MPPT Photovoltaic Multimeter & Watt Meter | Measures Power Output, Performance, and Open Circuit Voltage | Smart Portable Tool for Solar PV Panel Data & Troubleshoot

[Visit the elejoy Store](#)
4.3 ★★★★★ 12 ratings | [Search this page](#)

\$79⁰⁰

\$58.06 Shipping & Import Charges to El Salvador [Details](#)

Model: **EL400B**

EL400B
\$79.00

EY800W
\$89.00

EY1600W
\$99.00

Brand	elejoy
Power Source	Solar Powered
Style	Tech
Color	Red
Item dimensions L x W x H	6.5 x 3.15 x 1.18 inches

About this item

- **【Real-Time Measurements】** Accurately measures the Output Power of solar panels at their Max Power Point (Pmax), Performance, Open Circuit Voltage (Voc), and Short Circuit Current (Isc).
- **【Expert Troubleshooting Made Easy】** Quickly identify performance issues, compare actual output against specifications, and assess multiple panels effortlessly for comprehensive system diagnostics.
- **【Portable and No Battery Required】** Lightweight and portable, this tester is designed for easy use in the field. No batteries are required—simply connect to your solar panel to start testing immediately.
- **【Ultra Clear LCD Display】** You can see the real time readings clearly even under direct sunlight, making on-site diagnostics straightforward.
- **【Easy to Connect】** The MPPT Solar Controller comes with MC-4 connectors and alligator clips included, making it easy to set up and use.

Industrial & Scientific › Test, Measure & Inspect › Light Measurement



Roll over image to zoom in

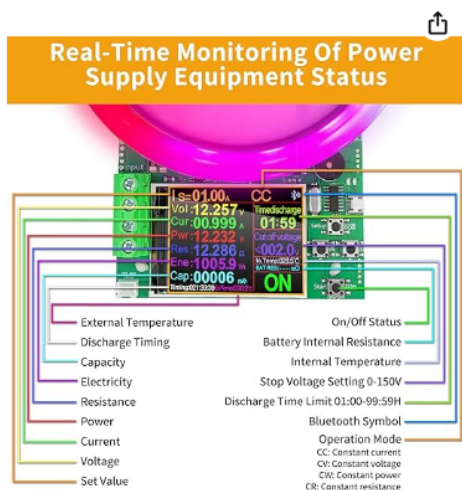
Solar Power Meter, Akozon Sun Light Radiation Testing Measuring Instrument for Solar Energy Research Meteorology Physical Optical Experiments

[Visit the Akozon Store](#)
4.7 ★★★★★ 19 ratings

This item cannot be shipped to your selected delivery location. Please choose a different delivery location.

- **【Application】** This light meter is widely used in solar measurement, solar energy research, meteorological, agricultural, physical and optical experiments to measure the light of glass to verify the performance of glass.
- **【Record Data】** The solar power meter is designed with a "HOLD" button to support maximum retention and data retention for easy recording, user-friendly data comparison and experimental research.
- **【LCD Display】** Solar meter is a precision instrument for measuring the of sunlight, large LCD display, 3-3 / 4 LCD display, maximum 3999, high resolution, wide range and short sampling time.
- **【Standard Parameters】** The sunlight meter has two units: W / m2 and Btu, and displays "OL" when overloaded. 9V battery (excluding battery), portable, compact, maximum 132 * 65 * 38mm / 5.2 * 2.6 * 1.5in. Measuring range: 0.1-399.9W / m2, 1-3999W / m2, 0.1-399.9Btu / (ft2-h), 1-3999Btu / (ft2-h).
- **【Easy to Use】** The solar radiation meter can be directly measured without adjustment, and the measurement is stable for a long time. Pay attention to the automatic measurement of the probe directly on the light source and keep the probe clean so as not to affect the measurement result.

[Report an issue with this product or seller](#)



Roll over image to zoom in

MakerHawk Battery Load Tester - 180W 200V 20A USB Load Tester 4-Wire System Adjustable Constant Current Voltage Discharge Lithium Battery Capacity Tester Electronic Load Tester

Visit the [MakerHawk Store](#)

5.0 ★★★★★ 1 rating | [Search this page](#)

\$69⁹⁹

\$97.90 Shipping & Import Charges to El Salvador [Details](#) ▼

Model: **180W**

150W

\$69.99

180W

\$69.99

Brand

MakerHawk

Power Source

Corded Electric

Style

4-Wire System USB Load Tester Adjustable Constant Current Intelligent Temperature Control High Precision Calibration 180W 200V 20A

Color

Green

Item dimensions L x W x H 7.87 x 5.51 x 7.87 inches

About this item

- **2.4" Large Screen Battery Load Tester:** Featuring a high-definition color screen, this electronic load tester provides clear and precise readings. It offers comprehensive parameter, settings and operations, including voltage, current, power, capacity, electricity, temperature, discharge resistance, time-limited discharge and stop voltage, etc., to ensure accurate and reliable results.
- **Multi-Device Compatibility & Safety Features:** This battery capacity tester supports discharge aging tests for a wide range of devices, including chargers, cables, power banks, batteries, and power adapters. It has intelligent safety protection such as overload, overcurrent and high temperature protection, real-time monitoring of status makes it safe and reliable.
- **Four Discharge Modes & App Compatibility:** The USB load tester supports constant current, constant power, constant resistance, and constant voltage modes. It is compatible with Android and iOS apps, as well as PC BT and wired connections, providing versatile testing options.
- **High Precision & Upgraded Four-Wire System:** Utilizing a four-wire connection, this voltage tester ensures

SOLAR MODULE EGE-50P-36 POLYCRYSTALLINE MODULE

50 W / 36 Cells / 5 Bus bars



Eco Green Energy's modules are only made of grade A solar cells with a very high efficiency and ensured more than 25 years lifespan.

KEY FEATURES

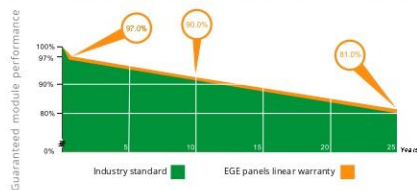
-  5 bus bars cells, with efficiency up to 21 %
-  IP67 junction box for long term weather endurance
-  High quality aluminum frame, resisting load up to 5400 Pa and wind pressure up to 2400 Pa
-  High transmissivity, low-iron tempered glass
-  High performance in low-light environment
-  Double EL test before and after lamination

CERTIFICATES

IEC 61215 / IEC 61730 / CE
ISO 9001:2015

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

12-Year Product Warranty · 25-Year Linear Power Warranty



25 YEARS OUTPUT POWER WARRANTY

12 YEARS PRODUCT WARRANTY



Eco Green Energy Group Ltd. 2018. All rights reserved.

ELECTRICAL DATA AT STC*

Power output (Pmax)	50 W
Power tolerance	0~+3 %
Module efficiency	14.14 %
Maximum power voltage (Vmp)	18.49 V
Maximum power current (Imp)	2.70 A
Open circuit voltage (Voc)	22.69 V
Short circuit current (Isc)	2.89 A

*Standard Test Conditions: Irradiance: 1 000 W / m²
Cell temperature: 25 °C • AM: 1.5

ELECTRICAL DATA AT NOCT*

Power output (Pmax)	36.99 W
Maximum power voltage (Vmp)	17.08 V
Maximum power current (Imp)	2.16 A
Open circuit voltage (Voc)	21.06 V
Short circuit current (Isc)	2.35 A

*Nominal Operating Cell Temperature: Irradiance: 800 W / m²
Ambiant temperature: 20 °C • AM: 1.5 • Wind speed: 1 m/s

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

NOCT	45 °C ±2 °C
Temperature coefficient of Pmax	-0.41%/°C
Temperature coefficient of Voc	-0.31%/°C
Temperature coefficient of Isc	+0.06%/°C

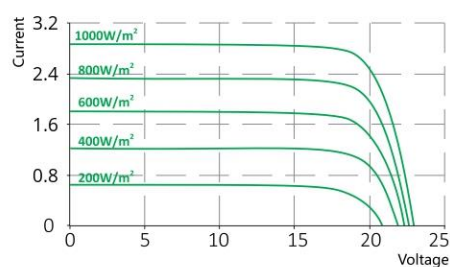
MAXIMUM RATINGS

Operating temperature range	-45 °C ~+85 °C
Maximum system voltage	1500 V
Max series fuse rating	20 A
Max front load (e.g.: snow)	5400 Pa
Max back load (e.g.: wind)	2400 Pa

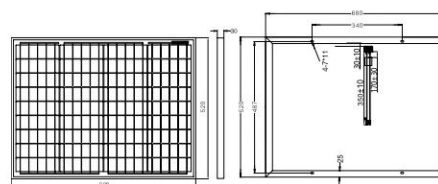
MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Polycrystalline (156.75x50 mm)
Number of cells	36
Dimensions	520x680x30mm
Weight	4.0 kg
Glass	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction box	IP67
Cable	0.35 m
Connector	MC4 or MC4 compatible

CURVES



ENGINEERING DRAWINGS (mm)



PACKAGING

Type	Pcs/ Type	Weight
Per Box	2 pcs	9 kg
20ft GP Container	2074 pcs	9.3 t
40ft GP Container	4431 pcs	19.9 t
40ft HQ Container	4902 pcs	22.1 t



Eco Green Energy Group Ltd. 2018. All rights reserved.
Add: 299 Xing Cheng Road, Chong Chuan District, Nantong,
Jiangsu, China
Tel: +86 513 66690088 / E-mail: info@eco-greenenergy.com

Specifications included in this datasheet are subject to change
without prior notice. Refer to our website for further information
or contact one of our sales staff.
www.eco-greenenergy.com

Anexo 4: Manuales de los dispositivos

Carga Electrónica Digital con Transmisión Bluetooth y Sistema de 4 Hilos

1. Introducción

Este dispositivo es una carga electrónica de propósito general, controlada digitalmente y diseñada para evaluar el rendimiento de diversas fuentes de energía de corriente continua como baterías, fuentes de alimentación, cargadores y paneles solares. Su diseño incorpora comunicación inalámbrica vía Bluetooth, una pantalla a color de alta definición, y un sistema de control que admite múltiples modos de operación con alta precisión y estabilidad.



DL24P 180W

2. Componentes principales y estructura interna

El núcleo funcional de este equipo está basado en un transistor de potencia (MOSFET) de alta disipación térmica, el cual actúa como elemento de carga dinámico. Este componente permite ajustar de forma continua la resistencia interna del circuito según el modo de operación seleccionado (CC, CV, CP, CR).

El MOSFET se encuentra montado sobre un disipador de calor de gran tamaño con ventilador activo, responsable de evacuar la energía absorbida durante la descarga. El sistema de monitoreo térmico integrado garantiza la protección del dispositivo, activando alarmas o desconectando la carga si se detectan condiciones de sobre temperatura.

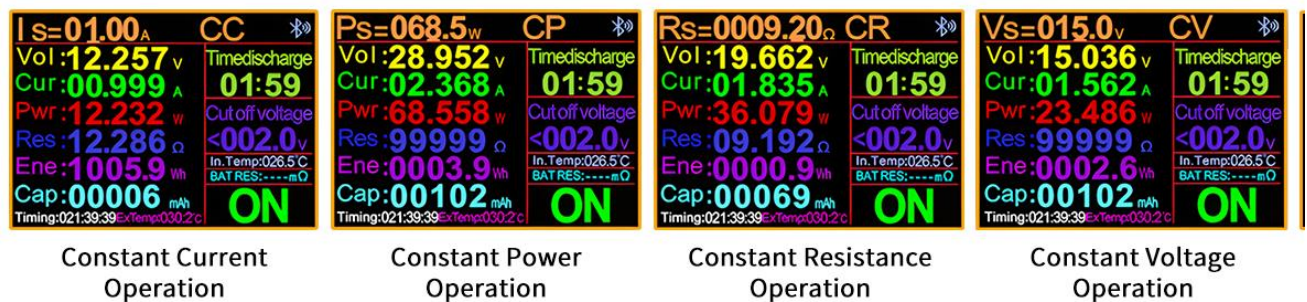
Además, el equipo posee entradas de prueba mediante terminales de conexión tipo banana, múltiples puertos USB (Mini, Micro, Tipo-C), una entrada de sensor de temperatura externo, botones de navegación y una interfaz gráfica intuitiva en pantalla.

3. Alimentación y puesta en marcha

- Tensión de entrada: DC 5.5V ~ 12V (recomendado: adaptador de 12V / 1A).
- Compatible con cargadores USB de 5V/2A y con protocolos QC/PD mediante puerto Tipo-C.
- Para una operación segura, se debe asegurar una ventilación adecuada del disipador y evitar exceder los valores máximos de potencia.

4. Modos de operación

El equipo admite cuatro modos de operación, seleccionables mediante la interfaz de usuario:



◆ Modo CC (Corriente Constante): mantiene constante la corriente de descarga ajustando dinámicamente la resistencia interna.

En el modo de corriente constante (CC), el equipo actúa como una carga electrónica programable capaz de mantener un flujo de corriente constante desde la fuente bajo prueba, (en este caso, el/los paneles solares fotovoltaicos) independientemente de las variaciones en su tensión.

Para lograr esto, el sistema emplea un transistor de potencia tipo MOSFET canal N, específicamente el modelo IRFP260M, operado en su región lineal activa, es decir, como un elemento de resistencia variable controlado.

El corazón del funcionamiento está en un lazo de retroalimentación cerrado: el microcontrolador mide en tiempo real la corriente que circula mediante una resistencia de derivación (shunt resistor) de precisión colocada en el circuito de la carga. Con esta información, ajusta la tensión aplicada a la compuerta (gate) del MOSFET, modulando así su resistencia entre drenaje y fuente.

Si la corriente medida es inferior al valor fijado, el controlador incrementa la conducción del transistor; si la corriente es superior, reduce la conducción. Este proceso ocurre de

forma continua y a alta velocidad para asegurar que la corriente descargada se mantenga exactamente en el valor deseado.

El IRFP260M, al operar en esta región, no actúa como un interruptor digital, sino como una carga analógica capaz de disipar energía eléctrica como calor.

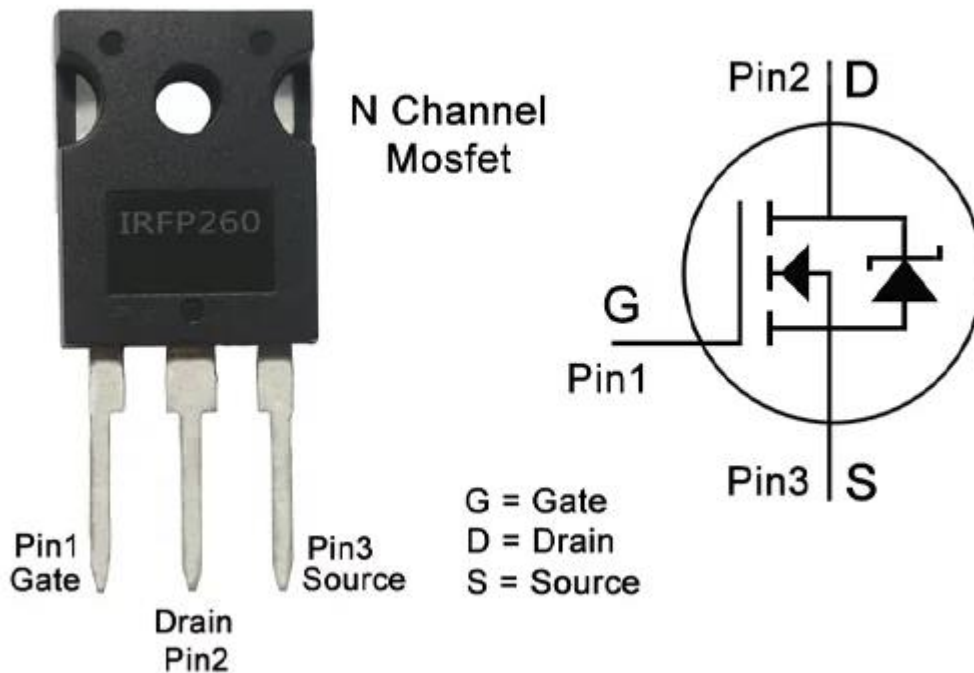
Dado que toda la potencia absorbida $P=V_{DS} \times I_{DP}$ se transforma en calor dentro del transistor, se requiere un disipador de calor de gran capacidad y un sistema activo de ventilación para evitar el sobrecalentamiento.

El sistema monitorea constantemente la temperatura del componente para activar protecciones térmicas si es necesario.

Esta arquitectura permite aplicar cargas precisas y estables para realizar pruebas como la caracterización de baterías (medición de capacidad efectiva), verificación de rendimiento en cargadores y adaptadores, evaluación de la entrega de corriente en puertos USB y para este caso particular: el trazado de curvas I-V en paneles solares fotovoltaicos.

Su implementación mediante un MOSFET de alta capacidad como el IRFP260M otorga robustez, confiabilidad térmica y una respuesta dinámica adecuada para aplicaciones exigentes de prueba electrónica.

TO-247 Package



◆ Modo CP (Potencia Constante): controla el punto de operación para mantener constante el producto $V \times I$.

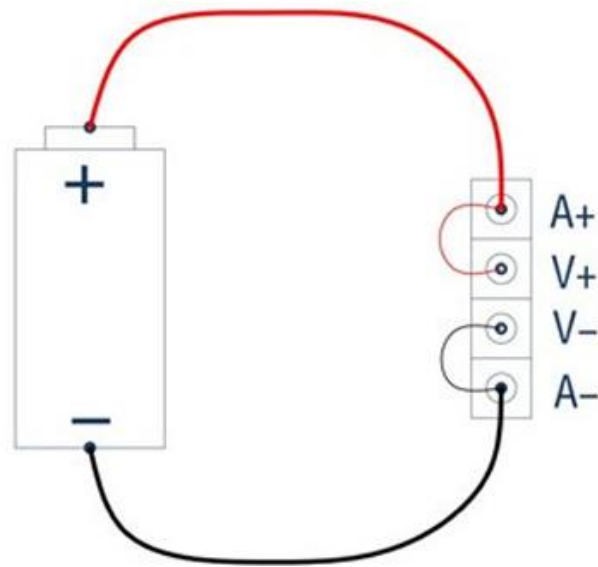
◆ Modo CR (Resistencia Constante): simula una carga resistiva fija basada en la relación V/I .

◆ Modo CV (Tensión Constante): regula la descarga para mantener una tensión fija, utilizado principalmente con fuentes de corriente.

Cada modo es útil en aplicaciones específicas, y el equipo permite configurar valores límite como tiempo de descarga y tensión de corte.

5. Funcionamiento detallado del modo CC

En el modo CC, el usuario configura un valor de corriente objetivo (ej. 2.00 A), y el sistema ajusta la resistencia interna para mantener ese flujo constante, independientemente de la variación de tensión en la fuente. Este principio se basa en la Ley de Ohm ($R = V/I$).



Aplicaciones típicas incluyen:

- Prueba de baterías: para calcular capacidad real (mAh / Wh).
- Evaluación de cargadores y paneles solares: para trazado de curvas I-V.
- Diagnóstico de cables: observando caída de tensión bajo carga constante.

Durante la prueba, la pantalla muestra en tiempo real de la tensión, corriente, potencia, capacidad acumulada y tiempo de operación.

El equipo interrumpe automáticamente la descarga si se alcanza la tensión de corte, tiempo máximo o si se activa alguna protección térmica o eléctrica.

6. Procedimiento general de uso

1. Conectar la fuente de prueba a los terminales correspondientes (A+ y A-).
2. Encender el dispositivo y acceder al menú de configuración.
3. Seleccionar el modo deseado (CC, CV, CP, CR).

4. Ajustar los valores de carga: corriente, tensión, potencia o resistencia.
5. Configurar parámetros opcionales como tiempo límite o tensión de corte.
6. Iniciar la descarga presionando el botón START.
7. Monitorear el comportamiento en pantalla.
8. Al finalizar, revisar los valores registrados y desconectar la fuente.

7. Funciones de protección y seguridad

- Protección contra sobrecorriente (OC).
- Protección contra sobretensión (OV).
- Protección por exceso de potencia (OP).
- Protección por temperatura elevada (OT).
- Alarma por temperatura externa (requiere sonda conectada).

Estas protecciones aseguran la integridad del equipo y la fuente bajo prueba.

8. Comunicación y software

El equipo puede conectarse a PC mediante cable USB (modo HID) o vía Bluetooth a dispositivos móviles.

PC Software Phone APP Control

Supports Apple and Android mobile phone APP, wired or wireless Bluetooth connection to computer



 En PC:

- Software oficial compatible con Windows 7/10.
- Permite monitoreo en tiempo real y exportación de datos a Excel.

 En móviles:

- Aplicación 'E_test' disponible en Google Play y App Store.
- Es necesario activar los permisos de ubicación y almacenamiento.
- Al conectar correctamente por Bluetooth, el ícono cambiará a color azul indicando éxito.

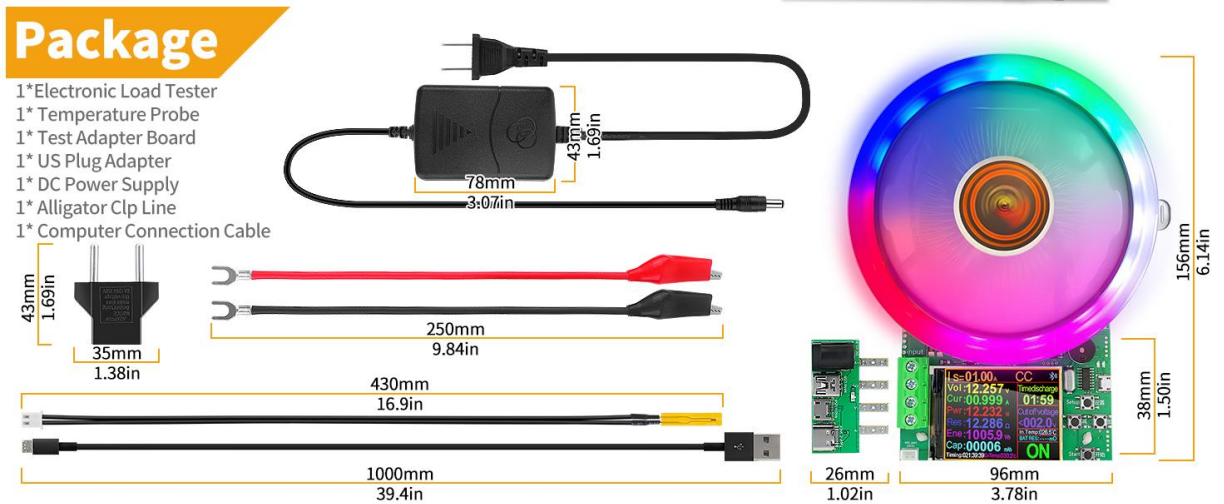
9. Aplicaciones adicionales

- Medición de capacidad en bancos de energía (power banks).
- Evaluación de cargadores mediante descarga prolongada y control de temperatura.
- Diagnóstico de cables USB y de carga, observando caída de tensión bajo carga.
- Análisis de la corriente máxima que un cargador puede entregar de manera sostenida.

10. Parámetros técnicos

Parámetro	Valor
-----	-----
Rango de tensión	2V ~ 200V
Rango de corriente	0.1A ~ 20A
Potencia máxima	150W (DL24) / 180W (DL24P)
Precisión de tensión	$\pm(0.5\% + 0.05V)$
Precisión de corriente	$\pm(0.5\% + 0.05A)$
Modos soportados	CC / CV / CP / CR
Interfaz de usuario	Botones físicos, pantalla a color
Comunicación	USB, Bluetooth

11. Accesorios incluidos



1 Medidor de Carga Electrónica

1 Sonda de Temperatura

1 Placa Adaptadora de Pruebas

1 Adaptador de Enchufe Tipo US

1 Fuente de Alimentación DC

1 Cable con Pinzas de Caimán

1 Cable de Conexión para Computadora

12. Mantenimiento preventivo

- No operar en ambientes húmedos o con polvo excesivo.
- Verificar regularmente el funcionamiento del ventilador.
- Evitar conectar fuentes que superen los límites nominales.
- Limpiar los conectores y el disipador con aire comprimido.
- Guardar en un lugar seco y ventilado cuando no se use.