



Revista UIS ingenierías

ISSN: 1657-4583

ISSN: 2145-8456

Universidad Industrial de Santander

Rúa-Ramírez, Edwin; Mendoza-Jiménez, Iván D.; Torres-Suarez, Edison; Flórez-Serrano, Elkin G.; Serrano-Rico, Juan C.
Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos
Revista UIS ingenierías, vol. 20, núm. 2, 2021, Abril-Junio, pp. 1-10
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553770380001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos

Didactic test bench for learning autonomous photovoltaic solar energy

Edwin Rúa-Ramírez ^{1a}, Iván D. Mendoza-Jiménez ^{1b}, Edison Torres-Suarez ^{1c},
Elkin G. Flórez-Serrano ^{2a}, Juan C. Serrano-Rico ^{2b}

¹ Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT), Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. Correos electrónicos: ^a edwin.rua@usantoto.edu.co, ^b ivan.mendoza@usantoto.edu.co, ^c edison.torres@usantoto.edu.co. Orcid: ^a 0000-0003-2028-3282

² Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica Universidad de Pamplona (GIMUP), Universidad de Pamplona, Colombia. Correos electrónicos: ^a eflorez@unipamplona.edu.co, ^b jcserrano@unipamplona.edu.co, Orcid: ^a 0000-0002-3431-146X, ^b 0000-0002-9836-6603

Recibido: 13 mayo, 2020. Aceptado: 11 noviembre, 2020. Versión final: 2 enero, 2021.

Resumen

Con la construcción de este banco de pruebas se logra realizar la caracterización de sistemas solares fotovoltaicos autónomos y además medir el rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos. Este banco de ensayos le permite a los estudiantes y usuarios conocer los componentes de un sistema fotovoltaico aislado para vivienda y validar el funcionamiento de cada uno de estos; componente de protección, las conexiones, el componente de transformación DC-AC, entre otros. El banco fue diseñado para realizar diferentes prácticas de laboratorio, tales como: identificar y evaluar la curva de operación de los paneles según la radiación recibida, medir voltaje y corriente de salida del sistema según sus conexiones en serie y paralelo, realizar conexiones para corriente directa o corriente alterna, entre otras. La práctica más compleja y relevante es la medición del rendimiento de los paneles solares, ya que se deben incluir unas resistencias a diferente capacidad medida para ir creando la curva de corriente vs voltaje (I vs V); se diseñó un circuito electrónico donde el panel es conectado a una carga resistiva variable y se registra el valor de corriente y voltaje. Para la medición de voltaje el multímetro se conecta en paralelo en el circuito y para la medición de amperaje se conecta en serie. Algunos de los resultados más importantes de las prácticas fueron; el poder identificar la variación significativa de la eficiencia de los paneles solares a medida que cambia la posición del sol, Identificar cómo la temperatura afecta el rendimiento del panel y determinar las condiciones excepcionales en las que un panel genera la energía especificada por el fabricante.

Palabras clave: banco de pruebas; energía solar fotovoltaica aislada; prácticas de laboratorio; rendimiento de paneles solares.

Abstract

With the construction of this test bench, it is possible to characterize autonomous photovoltaic solar systems and measure the performance of photovoltaic solar panels. This test bench allows students and users to know the components of an isolated photovoltaic system for homes and to validate the operation of each one of them; protection

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, CC BY-ND 4.0 

Como citar: E. Rúa-Ramírez, I. D. Mendoza-Jiménez, E. Torres-Suarez, E. G. Flórez-Serrano, J. C. Serrano-Rico, "Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos," *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 1-10, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n2-2021001](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021001)

component, connections, DC-AC transformation component, among others. The bench was designed to carry out different laboratory practices, such as: identifying and evaluating the operating curve of the panels according to the radiation received, measuring the output voltage and current of the system according to its series and parallel connections, making connections for direct current or alternating current, among others. The most complex and relevant practice is the measurement of the performance of solar panels, since resistors with a different capacity must be included to create the current vs. voltage curve (I vs. V); An electronic circuit was designed where the panel is connected to a variable resistive load and the value of current and voltage is recorded. For voltage measurement the multimeter is connected in parallel in the circuit and for amperage measurement it is connected in series. Some of the most important results of the practices were; being able to identify the significant variation in the efficiency of solar panels as the position of the sun changes, Identify how temperature affects the performance of the panel and determine the exceptional conditions in which a panel generates the energy specified by the manufacturer.

Keywords: test bench; isolated photovoltaic solar energy; laboratory practices; solar panel performance.

1. Introducción

En este trabajo describe el procedimiento desarrollado en el programa académico de Ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas, seccional Tunja-Colombia, el diseño y construcción de un banco de ensayo solar fotovoltaico, así como el resultado de las principales pruebas que en éste se pueden desarrollar. Específicamente para evaluar el rendimiento de los paneles monocristalinos en condiciones reales de trabajo. El banco fue diseñado para realizar seis (6) prácticas o aplicaciones de sistemas fotovoltaicos aislados. Éste, permite instalar el sistema a diferentes voltajes y corrientes, cambiar la configuración de conexión (serie y paralelo), tanto de los paneles, como de las baterías. Además, se puede variar los ángulos de incidencia solar en los paneles y/o adaptación de otros equipos solares fotovoltaicos con diferentes características.

Los experimentos en bancos de pruebas permiten ensayar instalaciones fotovoltaicas, reflejando las condiciones de funcionamiento reales y su influencia sobre los parámetros a medir. Es vital identificar la topografía e intensidad lumínica del sitio final en el cual se implementará el banco, con el fin de optimizar la posición, especialmente el ángulo respecto al sol, de los paneles solares, con el fin de maximizar la captación de radiación [1].

La eficiencia de un dispositivo fotovoltaico se define como la potencia máxima generada dividida por el producto de la irradiancia de entrada y su área. Esta eficiencia depende de muchos factores, como la irradiación, propiedades de los materiales y la temperatura.

Los procesos de fabricación de los paneles generalmente causan diferencias en los parámetros eléctricos, incluso en celdas del mismo tipo. Además, si se tienen en cuenta las pérdidas debidas a las conexiones celulares en un panel, es difícil encontrar dos paneles fotovoltaicos

idénticos. Por lo tanto, solo la medición experimental de la curva I-V permite conocer con precisión los parámetros eléctricos de éste. Esta medida proporciona información muy relevante para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos [2].

El Lic. Ricardo Lauretta, responsable del Laboratorio de Energía del Instituto Tecnológico de Buenos Aires asegura que “El ingeniero debe formarse en energías renovables. Hay muchos desafíos tecnológicos relacionados con el aprovechamiento de la energía que deberán ser abordados por las próximas generaciones de ingenieros. Su rol será central y es necesario que se formen en energías renovables, ya que se trata de una temática interdisciplinaria y requiere de la participación de todas las especialidades” [3].

La energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, impulsada por la necesidad de asumir los retos que se presentan en materia de generación de energía. Uno de ellos está relacionado directamente con los beneficios sociales. Se prevé que a medida que se comiencen a utilizar comercialmente estas nuevas tecnologías, se crearán nuevos puestos de empleo, permitiendo progreso económico para los trabajadores. Este crecimiento se ha producido gracias a los mecanismos de fomento de algunos países como España, que han propiciado un gran incremento de la capacidad global de fabricación, distribución e instalación de esta tecnología [4].

De acuerdo con J. Solano y E. Velásquez, la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía solar ha traído consigo una serie de aspectos favorables para reducir la contaminación del medio ambiente, mejorar la economía y calidad de vida de la humanidad en general. Es por eso por lo que dicha tecnología de origen francés se ha venido desarrollando y afianzando durante los últimos años. De esta manera con la implementación de un banco de pruebas solar fotovoltaico que permita interactuar didácticamente,

fomentará un aprendizaje significativo en los estudiantes, generará en los mismos un pensamiento más amigable con el medio ambiente y los preparará para las que serán las energías del futuro [5].

Según López y Montoya, se postula que en Colombia no se ha difundido mucho el uso de los paneles solares debido a la riqueza hídrica que tiene el país, pero con la aparición de fenómenos climáticos como el niño, se ha evidenciado la disminución de las fuentes hídricas, por tanto, el gobierno ha decidido incentivar el uso de esta fuente de energía, aprovechando que Colombia está en una zona tropical donde la incidencia solar es alta. En esta tesis cabe rescatar la importancia que le dan a que las Universidades fomenten el uso de energías renovables y planteen posibles soluciones que brinden beneficios al medio ambiente [6].

Tal como dice Durán y Romero un manual de prácticas es de gran utilidad para que los estudiantes mediante este puedan realizar prácticas de laboratorio en la universidad de forma sencilla y segura aportando al aprendizaje y desarrollo de conceptos referentes a la energía solar fotovoltaica. El Manual brinda ejemplos de diversidad de prácticas útiles para el proyecto entre las que destacan la aplicación de Instrumentos de medición de la radiación solar, el reconocimiento del sistema fotovoltaico, conexiones en serie y paralelo y conexión de los módulos FV, en circuito serie y circuito paralelo para alimentar cargas en CC. [7].

El rendimiento de un módulo fotovoltaico (PV) depende de las condiciones reales de funcionamiento, como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento, además de las tecnologías de módulos solares. Como indican moreno. et al. (2019) El aumento de la temperatura superficial afecta la eficiencia de los paneles fotovoltaicos además esta es mayor que la temperatura ambiente, debido al efecto invernadero creado entre las células solares y el cristal protector [8].

H. Amiry et al. (2018) describen las características de un dispositivo de adquisición de bajo costo para caracterizar un módulo fotovoltaico en espacio abierto. Se basa en un conjunto de MOSFET IRF540N y resistencias de carga, una placa Arduino y sensores de corriente y voltaje con alta resolución y frecuencia de muestreo. Este sistema permite barrer toda la curva I-V tomando un punto de corriente-voltaje (I, V) dentro de un ms. Se investigan los efectos de la temperatura de funcionamiento y la irradiancia solar en el rendimiento del módulo. Los parámetros físicos del módulo se han extraído mediante dos métodos que utilizan tres modelos de células solares.

Se calculan los coeficientes de corrección de temperatura para corriente, voltaje y eficiencia. Los resultados muestran una buena relación con los encontrados en la literatura [9].

El rendimiento de un sistema fotovoltaico (PV) depende de varios factores, como la disponibilidad de radiación solar y su espectro distribución, temperatura del módulo fotovoltaico, suciedad, pérdidas de cable, degradación de la energía fotovoltaica con el tiempo, etc. Un factor importante que también afecta la potencia de la matriz fotovoltaica es la pérdida de desajuste debido a las diferencias entre los módulos individuales, ya que es inherente a la fabricación, procesar cierta variabilidad en los parámetros de la curva I - V. La tecnología de fabricación de módulos fotovoltaicos ha mejorado considerablemente, resultando de una mayor eficiencia y un mejor proceso de control de calidad, que permitió un rango de tolerancia de potencia máxima más bajo de módulos fotovoltaicos (FV) disponibles capaz en el mercado. La posibilidad de realizar una nueva selección de módulos fotovoltaicos con una mejor coincidencia actual no fue relevante en comparación con las cadenas aleatorias. La selección realizada en fábrica para un módulo fotovoltaico con la misma potencia nominal es suficiente para evitar pérdidas de desajuste considerando que los módulos fotovoltaicos se clasificaron utilizando procedimientos estándar [10].

Un experimento fue realizado para extraer un conjunto de datos que incluye registros de radiación solar, temperatura ambiente, corriente y voltaje para diferentes módulos fotovoltaicos. El modelo desarrollado es un modelo general para todos los módulos fotovoltaicos, mientras que las entradas del modelo son radiación solar, temperatura ambiente y especificaciones de la hoja de datos del módulo fotovoltaico (voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito). Matlab se utiliza para entrenar, probar y validar el modelo propuesto. Además, este se valida experimentalmente. Los resultados muestran que tiene una alta precisión en la predicción de curvas I-V con un error medio porcentual absoluto medio, un error de sesgo medio y un error medio cuadrático medio de 1.09%, 0.0229 A y 0.0336 A respectivamente. Tal modelo es muy útil para generar curvas I-V para diferentes módulos fotovoltaicos [11].

Se analizaron 48 módulos fotovoltaicos de 5 modelos diferentes, que totalizaron un pico de potencia de 10.16 kWp derivado del sistema fotovoltaico instalado en el Laboratorio de Investigación de Electrónica de Potencia en la Universidad Federal de Uberlandia-Brasil (NUPEP-FEELT-UFU). Inicialmente, todos los módulos se limpiaron adecuadamente. Con el propósito de evaluar cualquier degradación duradera, se realizó una

inspección visual, y para el análisis de la distribución de calor a través de la superficie de los módulos, se obtuvieron y evaluaron imágenes termográficas con el objetivo de identificar los puntos calientes, luego estos signos se relacionaron con la degradación identificada durante la inspección. Además, con el objetivo de cuantificar el impacto de las fallas en el rendimiento eléctrico, las curvas I-V y P-V se midieron en 2017 y 2018, tanto individualmente como en forma de cadena, para obtener los principales parámetros eléctricos [12].

Se describe el diseño práctico de un trazador de curva IV portátil controlado inalámbricamente basado en una carga capacitiva. El diseño está optimizado para la medición de módulos de células solares que presentan un alto voltaje de circuito abierto de hasta 6 kV y una baja corriente de cortocircuito por debajo de 100 mA. El trazador IV portátil permite la caracterización in situ / in situ de módulos grandes en condiciones reales de funcionamiento y permite la detección rápida de posibles fallas de anomalías en el comportamiento eléctrico. Las cargas electrónicas disponibles actualmente solo manejan voltajes de hasta alrededor de 1 kV. Para superar los problemas de costo y seguridad relacionados con las aplicaciones de alto voltaje, el diseño se basa en componentes de bajo costo, suministro aislado basado en baterías y comunicación inalámbrica. Se implementó un prototipo y se probó en el campo para la caracterización de diferentes módulos fotovoltaicos orgánicos (OPV) hechos de acuerdo con el concepto de infinito con una gran cantidad de uniones instaladas en serie (7.450 uniones) que presentan voltajes de circuito abierto de hasta 5.6 kV [13].

El modelado preciso y robusto de la curva I-V, característica de un módulo fotovoltaico, es esencial en muchas aplicaciones enfocadas en pronosticar y predecir el rendimiento fotovoltaico (PV). El modelo equivalente de diodo único se ha utilizado ampliamente para representar los principios de funcionamiento de las células solares. Este trabajo presenta una metodología simple para resolver la ecuación de un solo diodo a partir de los parámetros de la hoja de datos del fabricante, combinando la función Lambert-W y un procedimiento iterativo sobre el factor de idealidad del diodo, que tiene una rápida convergencia y robustez. El modelo se evaluó comparándolo con curvas experimentales I-V medidas para diferentes módulos en condiciones interiores y exteriores con buenos resultados. El análisis de sensibilidad también se ha realizado para indicar el posible impacto de la incertidumbre de los parámetros iniciales que ingresan el modelo [14].

Indican Ramirez, et al. (2019), que el banco de pruebas implementado logra cumplir con el propósito del proyecto, que es Proporcionar un entorno controlado en el que los estudiantes puedan interactuar con una instalación fotovoltaica de forma segura y práctica [15].

2. Metodología

La obtención de la curva de potencia y rendimiento de un panel fotovoltaico normalmente implica el uso de costosos y complejos sistemas de medida que suelen quedar fuera del alcance del propietario de una instalación solar aislada. Se hace necesario el uso de un sistema que facilite la determinación en campo de la eficiencia de paneles fotovoltaicos, así como también de posibles defectos en éstos.

2.1. Ecuaciones para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para el dimensionamiento se usaron las siguientes ecuaciones:

La energía total generada (E_T) en forma de potencia [W] por los paneles, teniendo en cuenta el rendimiento (R) y el número de paneles (N) es dada por la Ecuación (1) y Ecuación (2).

Con la Ecuación 1 se calculó la energía total o real generada por los paneles teniendo en cuenta el rendimiento donde la (E_p) es la energía o potencia generada por los paneles.

$$E_T = E_p * R \quad (1)$$

La capacidad útil de la batería (C_u) en [Ah] se determina involucrando el N (número de días de autonomía), voltaje del sistema y profundidad de descarga (pd) al 50% máximo.

$$C_u = \frac{E_T * N}{V * Pd} \quad (2)$$

La potencia del inversor se determinó usando la potencia nominal de los paneles y adicionando un factor de seguridad de 1.25, (recomendado por los expertos) esta potencia es de 250 [W].

La corriente a corto circuito máxima teniendo en cuenta factor de seguridad (F_s) se determina por:

$$I_{sc_{max}} = I_{sc} * F_s \quad (3)$$

Donde el factor de seguridad tomado es de 10% (recomendado por expertos).

$$P = V * I \quad (4)$$

La corriente eléctrica teniendo como base la potencia eléctrica.

$$I = \frac{P}{V} \quad (5)$$

El rendimiento de panel fotovoltaico se determinó con la siguiente ecuación.

$$\eta_1 = \frac{FF * Voc * Isc}{G * A} \quad (6)$$

Donde FF es el factor de forma sin dimensiones, VOC es el Voltaje a circuito abierto, I_{sc} es la corriente de corto circuito en [A].

Con la Ecuación 7 se calculó el factor de forma.

$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{Voc * Isc} \quad (7)$$

Para calcular el rendimiento de paneles fotovoltaicos se usan condiciones estándar de irradiancia y temperatura utilizadas universalmente según la norma IEC 60904-1, para así caracterizar células, módulos y generadores solares.

Condiciones Estándar de Medida (STC) según la norma IEC 60904-1 [16]:

- Irradiancia: 1000 W/m²
- Temperatura de las células: 25 °C
- Distribución espectral de la luz: AM1.5G (de acuerdo con IEC 60904-3).

2.2. Componentes del sistema fotovoltaico

A continuación, se presentan los equipos y sus respectivas características que componen el sistema fotovoltaico del banco de pruebas.

Se seleccionó dos Paneles fotovoltaicos de 100 [W] de potencia nominal, y eficiencia nominal de 16%, voltaje de máxima potencia de 18 [V], intensidad en máxima potencia de 5.56 A, voltaje de corto circuito V_{oc} de 22.32 [V] y corriente de corto circuito I_{sc} = 6 [A].

Se eligió un regulador de carga de 12 V y 30 A de la marca Jarreti, con entrada máxima de voltaje de los paneles de 55 V

Además, dos baterías de gel, con voltaje nominal de 12 V y 26 Amp.h. Las baterías poseen voltaje de flotación entre 13.5 – 13.8 V, voltaje en modo cíclico entre 14.4 – 14.9 V y corriente inicial de 7.8 A.

Finalmente, un Inversor de 300 [W] de potencia nominal, voltaje de entrada de 12 V y voltaje de salida de 220 V/110 V $\pm 5\%$ y corriente de carga de 20 A.

2.3. Diseño del banco de pruebas solar fotovoltaico

Se implementó la técnica “lluvia de ideas” para iniciar el proceso de diseño del banco de pruebas fotovoltaico, cumpliendo con las estrategias que propone este método, se procedió a delimitar el objetivo del diseño centrándose en un tema específico, el cual fue la construcción de un banco de pruebas solar fotovoltaico para prácticas de laboratorio, para que las ideas postuladas fueran más productivas.

2.4. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico

El diagrama unifilar (ver Figura 1) representa la conexión de todos los componentes que conforman el banco solar fotovoltaico. A continuación, se explica su funcionamiento:

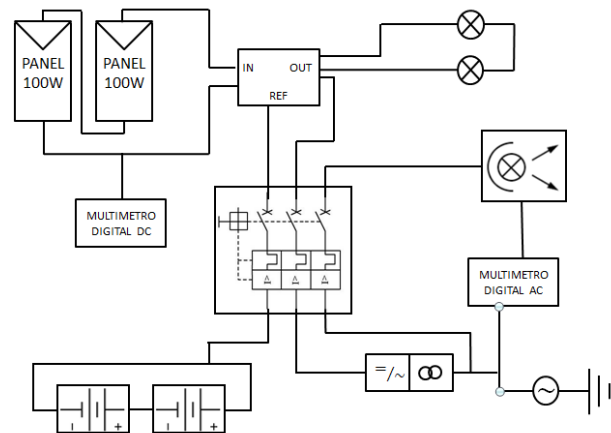


Figura 1. Diagrama unifilar. Fuente: elaboración propia.

La generación eléctrica inicia a través de dos paneles de 100w y a estos está conectado un multímetro digital para medir la DC generada. También están conectados los paneles a una caja de breaker de protección. Esta caja de Breaker permite la llegada de electricidad al regulador y a unos bombillos de 12 y 24v. El regulador está conectado a las dos baterías de gel y a un inversor monofásico. Al inversor está conectado un Multímetro digital de AC y una regleta eléctrica multitoma.

La descripción de las prácticas de laboratorio que se pueden realizar en el banco solar fotovoltaico se detalla en [17].

3. Resultados

Tras elegir el boceto más viable para la construcción del banco solar, se procedió a realizar el CAD utilizando el software SolidWorks® para llevar a cabo el diseño implementando los componentes que conforman la estructura del banco de pruebas solar fotovoltaico. Se buscó un sistema que permitiera, de manera controlada, modificar la inclinación del soporte de los paneles, para cumplir esta tarea se decidió ensamblar dos brazos hidráulicos en cada extremo lateral del banco cuya función fuera pivotar la estructura de paneles de acuerdo con la inclinación deseada o en su defecto regresar a su posición horizontal original. En la Figura 2 se muestra el banco de pruebas diseñado y construido.



Figura 2. Ilustración de banco de pruebas fotovoltaico.
Fuente: elaboración propia.

3.1. Generación de curvas características I-V y P-V para evidenciar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos monocristalinos

Para la validación del funcionamiento del banco de pruebas se realizaron mediciones de rendimiento de los dos paneles fotovoltaicos, se realizó un circuito electrónico (ver Figura 3) donde se conectó al panel una carga resistiva de diferente valor en ohmios y se toma el valor de corriente y voltaje, para la medición de voltaje el multímetro se conecta en paralelo en el circuito y para la medición de amperaje se conecta en serie.

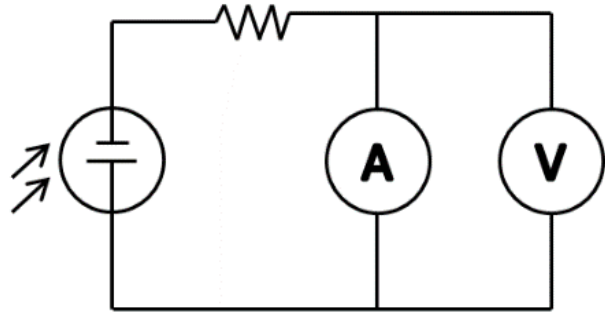


Figura 3. Esquema del circuito electrónico para medir corriente y voltaje de los paneles fotovoltaicos.
Fuente: elaboración propia.

Las mediciones se llevaron a cabo en el parqueadero del edificio Santo Domingo de Guzmán, Universidad Santo Tomas, seccional Tunja, el 20 de noviembre de 2019. Las mediciones se evidencian en las Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Datos de amperaje y voltaje con cielo despejado

$R (\Omega)$	$I (mA)$	$V (V)$	$P (W)$
10	5.23	20.89	109.25
30	3.42	21.39	73.15
82	2.63	21.80	57.33
120	1.87	21.70	40.58
220	1.03	21.89	22.55
300	0.76	21.93	16.67
390	0.58	21.40	12.41
470	0.48	22.01	10.56
510	0.43	21.99	9.46

* se generaron curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Datos de amperaje y voltaje con cielo nublado

$R (\Omega)$	$I (mA)$	$V (V)$	$P (W)$
30	4.81	11.30	54.35
52	3.53	17.62	62.20
82	2.47	19.43	47.99
220	0.95	19.95	18.95
310	0.71	20.62	14.64
390	0.51	20.64	11.35
470	0.34	20.51	9.02
510	0.30	20.70	8.28

* se generaron curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos. Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos de las tablas anteriores se generaron las curvas características I - V y P - V , en la Figura 4 y Figura 5 se observa el comportamiento de los paneles fotovoltaicos con diferentes valores de cargas resistivas.

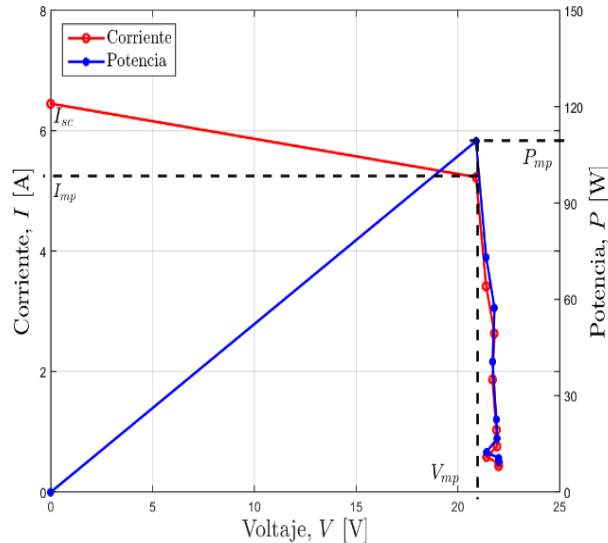


Figura 4. Curva de productos corriente-voltaje P - V y Curva I - V de los paneles fotovoltaicos generada con los datos de la Tabla 1. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 la corriente de corto circuito I_{sc} es 6.43 A, la corriente en máxima potencia I_{mp} es 5.23 y el voltaje en máxima potencia V_{mp} es 20.89

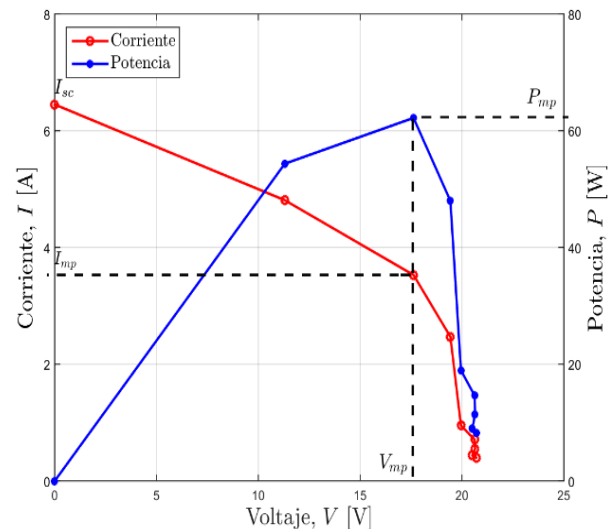


Figura 5. Curva P - V de los paneles fotovoltaicos generada con los datos de la Tabla 2. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 la corriente en máxima potencia I_{mp} es 3.23 y el voltaje en máxima potencia V_{mp} es 18.43

3.2. Cálculo de rendimiento de los paneles fotovoltaicos

Se realizó el cálculo de rendimiento de los paneles con base a las curvas características de I - V y los datos de I_{mp} y V_{mp} obtenidos, primero se calculó el rendimiento η_1 con los datos de la Figura 1 y después se calculó el rendimiento η_2 haciendo uso de la Figura 3. Los cuales se muestran en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Medición del rendimiento de los paneles a cielo despejado y cielo nublado

Parámetro	Cielo Despejado	Cielo Nublado
Rendimiento, η [%]	15.69	6.84
Factor de Forma, FF	0.8205	0.358

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Con el objetivo de conocer cuál es el porcentaje de luz solar absorbida por un panel y transformada en energía eléctrica, se realiza una serie de mediciones que permiten evaluar en condiciones reales. Para un determinado momento con una irradiancia de 1000 W/m^2 los paneles de esta instalación alcanzaron un rendimiento de 15.69 % aproximadamente, lo cual es un buen indicador debido a que es un valor sobresaliente para la tecnología de estos (monocristalinos $\approx 16\%$).

Al realizar mediciones experimentales de los paneles a la intemperie a diferentes condiciones climáticas se logró observar una clara diferencia de rendimientos de los paneles fotovoltaicos en su tarea de generar energía, ya que, con condiciones climáticas de cielo despejado los paneles arrojaron un rendimiento de 15.69 %, en cambio con condiciones de cielo nublado hubo una disminución considerable evidenciando un rendimiento de 6.84 %.

El banco de pruebas implementado logra cumplir con el propósito del proyecto, el cual es brindar un sistema de medida de parámetros de paneles fotovoltaicos que permite caracterizar estos módulos en condiciones de trabajo en un entorno controlado. De esta forma se puede obtener información adicional de cara a la elección óptima de los paneles más adecuados para una instalación fotovoltaica en una zona establecida o posibles fallas en las celdas de los paneles fotovoltaicos.

Si bien el sistema construido no es de la misma precisión que se puede lograr en un laboratorio acreditado con tecnología de punta, por lo menos este banco solar fotovoltaico nos permite determinar si un panel fotovoltaico presenta una pérdida importante en el rendimiento de un sistema solar fotovoltaico aislado.

El banco solar fotovoltaico será un equipo útil para la rama de energías, donde se podrán realizar prácticas, y a través de ellas aprender a diseñar, dimensionar, seleccionar, e instalar sistemas fotovoltaicos para aplicaciones como electrificación para viviendas aisladas, iluminación pública, semaforización solar, bombeo de agua, entre otros. Teniendo en cuenta revisiones y precauciones que se deben seguir con los equipos que conforman un sistema fotovoltaico.

Referencias

- [1] E. Rúa, A. González, A. Granados, R. Ramírez, “Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá”, *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, vol. 9, no. 2, pp. 1-11, 2019.
- [2] E. Durán, M. Piliougeine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galán, J. M. Andújar, “Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review”, en *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109 / PVSC.2008.4922578
- [3] R. Laurretta, “Interviewee, El ingeniero debe formarse en energías renovables”, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://www.itba.edu.ar/el-ingeniero-debe-formarse-en-energias-renovables/>
- [4] U. J. Barbosa, M. A. Mayorga, S. W. Santamaria, D. M. García, “Iluminación con energía solar fotovoltaica para autoservicios en Bogotá”, *Ingenio Magno*, vol. 5, no. 1, pp. 81-94, 2014.
- [5] E. J. Velásquez Solano, J. B. Solano Rodríguez, “Banco de pruebas de energía solar fotovoltaica con el fin de generar energía eléctrica para las luminarias de la Plazoleta a la Vida de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña”, tesis doctoral, Universidad Francisco de Paula Santander, 2015.
- [6] A. López, C. Montoya, “Prototipo de laboratorio que permite verificar parámetros técnicos en paneles”, trabajo de grado, Universidad de San Buenaventura, 2017.
- [7] S. A. H. Moreno, E. R. Ramirez, A. D. L. Bonilla, G. G. M. Contreras, B. F. O. García, “Characterization of a monocrystalline photovoltaic solar panel with cooling to improve its performance”, *Technology*, vol. 10, no. 11, pp. 297-306, 2019.
- [8] A. Durán, B. Romero, “Estudio de reconocimiento sobre la Energía Solar”, tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [9] H. Amirya, M. Benhmidaa, R. Bendaouda, C. Hajjaja, S. Bounouara, S. Yadira, K. Raïsa, M. Sidkia, “Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions”, *Energy Conversion and Management*, vol. 169, no. 1, pp. 206-216, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.046
- [10] F. P. Gasparin, A. J. Bu'hler, G. A. Rampinelli, A. Krenzinger, “Statistical analysis of I–V curve parameters from photovoltaic modules”, *Solar Energy*, vol. 131, pp. 30-38, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.01.061
- [11] T. Khatib, A. Ghareeb, M. Tamimi, M. Jaber, y S. Jaradat, “A new offline method for extracting I-V characteristic curve for photovoltaic modules using artificial neural networks”, *Solar Energy*, vol. 173, pp. 462-469, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.092
- [12] A. M. Silva, F. C. Melo, J. H. Reis, L. C.G. Freitas, “The study and application of evaluation methods for photovoltaic modules under real operational conditions, in a region of the Brazilian Southeast”, *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 1189-1204, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.129
- [13] R. García-Valverde, S. Chaouki-Almagro, M. Corazza, N. Espinosa, M. Hösel, R. R. Søndergaard, M. Jørgensen, J. A. Villarejo, F. C. Krebs, “Portable and wireless IV-curve tracer for >5 kV organic photovoltaic modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 151, pp. 60-65, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.02.012
- [14] J. Polo, N. Martín-Chiveleta, M. C. Alonso-García, H. Zitouni, Miguel Alonso-Abella, C. Sanz-Saiza, y N. Vela-Barrionuevo, “Modeling I-V curves of photovoltaic modules at indoor and outdoor conditions by using the Lambert function. Energy Conversion and Management”, vol. 195, no. 1, pp. 1004-1011, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.085

[15] E. R. Ramirez, S. A. H. Moreno, M. E. R. Soler, G. G. M. Contreras, R. B. León, “Learning of autonomous photovoltaic solar energy through a didactic test bench”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 10, no. 10, pp. 263-271, 2019.

[16] *Measurement Principles of PV Current Voltage Characteristics*, IEC 904-1.

[17] I. D. Mendoza Jiménez, E. A. Torres Suárez, “Construcción de un banco de pruebas solar fotovoltaico para el laboratorio de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás Tunja”, trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, 2019.