

Análisis de la ganancia de potencia generado por el reverso de un módulo fotovoltaico bifacial

Analysis of the power gain generated by the back of a bifacial photovoltaic module

Frans Alex Gonzales Figueroa¹

fa.gonzalesf@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-1741-6881>

Arles Lucero Choque Torres

al.choquet@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0009-0009-1810-5517>

Vianey Daysi Chura Palli

vd.chura.pa@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-0439-4273>

Edisson Jiro Cruz Ticona

edissonjiro@gmail.com – Universidad Nacional de Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0001-9477-9016>

Rousell Dario Montes Apaza

rd.montes@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-0819-2898>

Recibido (Received): 01/08/23 | Aceptado (Accepted): 11/09/23

Resumen

El uso y aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica va en aumento debido a que con el paso del tiempo su tecnología es cada vez más eficiente y mayor capacidad de generación eléctrica, en los cuales destaca los paneles solares bifaciales debido a un incremento en la potencia de generación que es contribuida por el lado reverso. En el Perú los nuevos proyectos fotovoltaicos apuestan por este tipo de tecnología que involucran módulos fotovoltaicos bifaciales. Sin embargo, se desconoce cuál es el aporte en la potencia generada por el reverso de un módulo fotovoltaico bifacial y que tan influyente es con respecto a la generación eléctrica total que puede entregar un módulo fotovoltaico bifacial. Por este motivo se plantea analizar la ganancia de potencia o ganancia bifacial generado por el reverso de un módulo fotovoltaico bifacial a través de un trazador de curvas IV para medir sus parámetros eléctricos del módulo. Para este artículo se utilizó un panel solar bifacial monocristalino de 405W el cual se encuentra instalado en el instituto de investigación de energías renovables y eficiencia energética de la Universidad Nacional de Juliaca – Sede Ayabacas, para obtener la ganancia bifacial se aplicó el método de la irradiancia elevada G_e en exteriores, el cual consta de medir las bifacialidades del lado frontal y reverso del panel solar bifacial en STC. Los resultados muestran que la ganancia de potencia aportada por el reverso de un módulo fotovoltaico bifacial es de 14.44% de la potencia máxima total entregada por el módulo fotovoltaico bifacial. Se concluye que la contribución de la ganancia de potencia del reverso de un panel solar bifacial tiene gran influencia en la capacidad máxima de la generación eléctrica de un módulo fotovoltaico bifacial.

Palabras claves: *frontal, ganancia de potencia, modulo fotovoltaico bifacial, reverso y trazador de curvas I-V.*

Como citar: Gonzales-Figueroa, F. A., Choque-Torres, A. L., Chura-Palli, V. D. & Cruz-Ticona, E. J. (2023). Análisis de la ganancia de potencia generado por el reverso de un módulo fotovoltaico bifacial. ÑAWPARISUN – Revista de Investigación Científica de Ingenierías, 4(3), 13-21.

¹ Corresponding author: *fa.gonzalesf@unaj.edu.pe*

Abstract

The use and exploitation of photovoltaic solar energy is increasing due to the fact that over time its technology is becoming more efficient and greater electricity generation capacity, in which bifacial solar panels stand out due to an increase in the power of generation that is contributed by the reverse side. In Peru, the new photovoltaic projects are committed to this type of technology that involves bifacial photovoltaic modules. However, it is unknown what the contribution is in the power generated by the back of a bifacial photovoltaic module and how influential it is with respect to the total electrical generation that a bifacial photovoltaic module can deliver. For this reason, it is proposed to analyze the power gain or bifacial gain generated by the back of a bifacial photovoltaic module through an IV curve tracer to measure its electrical parameters of the module. For this article, a 405W monocrystalline bifacial solar panel was used, which is installed in the Renewable Energy and Energy Efficiency Research Institute of the National University of Juliaca - Ayabacas campus, to obtain the bifacial gain the irradiance method was applied. high G_e outdoors, which consists of measuring the bifacialities of the front and reverse side of the bifacial solar panel in STC. The results show that the power gain provided by the back of a bifacial photovoltaic module is 14.44% of the total maximum power delivered by the bifacial photovoltaic module. It is concluded that the contribution of the power gain from the back of a bifacial solar panel has a great influence on the maximum capacity of the electrical generation of a bifacial photovoltaic module.

Keywords: front, power gain, bifacial photovoltaic module, reverse and curve tracer I-V.

Introducción

Las energías renovables son cada vez más utilizadas a nivel mundial, donde el uso y las aplicaciones que se da a la energía solar son amplias, siendo una de ellas la energía solar fotovoltaica, donde el mercado de módulos fotovoltaicos bifaciales ha crecido considerablemente en los últimos años debido a la posibilidad de aumentar el rendimiento y la ganancia de potencia en comparación con los módulos fotovoltaicos monofaciales, ya que pueden absorber radiación solar por ambas caras tanto el lado frontal y reverso (Kenny et al., 2018).

En el Perú de la misma forma va tomando fuerza el ingreso de los módulos fotovoltaicos bifaciales por su aporte de energía por la parte inversa del mismo. Las ganancias bifaciales de los módulos fotovoltaicos bifaciales dependen de diferentes factores relevantes (albedo del suelo o superficie reflectante, ubicaciones geográficas, altura e inclinación del módulo), los mencionados factores se deben de considerar para la instalación de módulos fotovoltaicos bifaciales (Shoukry et al., 2016).

Para determinar la ganancia bifacial se debe tener en cuenta la BSTC (Bifacial Standar Test Condition) ya que los módulos fotovoltaicos bifaciales requieren un modelo de prueba específico en vista de que dependen de más factores que los módulos fotovoltaicos monofaciales o tradicionales, teniendo en cuenta las especificaciones de la IEC (Tartaglia, 2019).

En este sentido se debe realizar el análisis de la ganancia de potencia generado por la parte reversa del módulo fotovoltaico bifacial con el objetivo de determinar la ganancia bifacial a condiciones reales experimentadas al aire libre en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables y Eficiencia energética. El cual se realiza mediante la obtención de datos de un módulo fotovoltaico bifacial a SCT (Standar Test Condition) de la parte frontal y reverso de forma independiente, para luego a través de la resolución de modelos matemáticos convertirlos a

BSTC (Bifacial Standar Test Condition), con el cual se pretende demostrar cuanto es la ganancia bifacial que puede lograr alcanzar a condiciones reales en el cual también se encuentran instalados los demás sistemas con módulos fotovoltaico monofaciales.

Materiales y métodos

El presente estudio se realizó en el Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética de la Universidad Nacional de Juliaca – Sede Ayabacas, el cual se encuentra a una altitud de 3832 m.s.n.m. latitud de -15.4068° y una longitud de -70.0913° . en el lugar se instaló un módulo fotovoltaico bifacial monocristalino de 405W de la marca Trina Solar, el cual se encuentra instalado a un ángulo de inclinación de 25° con orientación norte, la estructura del módulo se encuentra a una altura de 1.25m entre el borde inferior del módulo con respecto al suelo. En la Figura 1, se muestra la ficha técnica del módulo fotovoltaico bifacial utilizado.

ELECTRICAL DATA (STC)					
Peak Power Watts-P _{max} (Wp)*	390	395	400	405	410
Power Output Tolerance-P _{max} (W)	0 ~ +5				
Maximum Power Voltage-V _{mp} (V)	40.2	40.5	40.8	41.1	41.4
Maximum Power Current-I _{mp} (A)	9.71	9.76	9.81	9.86	9.91
Open Circuit Voltage-V _{oc} (V)	48.5	48.7	48.9	49.1	49.3
Short Circuit Current-I _{sc} (A)	10.25	10.29	10.33	10.37	10.41
Module Efficiency η (%)	19.0	19.2	19.5	19.7	20.0
STC Irradiance 1000W/m ² , Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. *Measuring tolerance: ±3%					
Electrical characteristics with different rear side power gain (reference to 405 Wp front)					
Maximum Power-P _{max} (Wp)	425	446	466	486	506
Maximum Power Voltage-V _{mp} (V)	41.1	41.1	41.1	41.1	41.1
Maximum Power Current-I _{mp} (A)	10.35	10.85	11.34	11.83	12.33
Open Circuit Voltage-V _{oc} (V)	49.2	49.3	49.4	49.5	49.5
Short Circuit Current-I _{sc} (A)	10.89	11.41	11.93	12.44	12.96
P _{max} gain	5%	10%	15%	20%	25%
Power Bifaciality 70±5%					

Figura 1. Ficha técnica del módulo fotovoltaico bifacial.

Trazador de curvas I-V

El trazador de curvas I-V es un equipo que toma muestra de los datos de los parámetros fotovoltaicos, irradiancia incidente sobre el modulo y temperatura de celda, los datos mostrados son tanto a condiciones de operación o medidos al instante, en STC y NOCT (Vargas & Abrahamse, 2014). Para la adquisición y

recolección de datos se utilizó el trazador de curvas I-V de la marca Gossen Metrawatt PROFITEST PV el cual se encargará de medir los parámetros fotovoltaicos del módulo fotovoltaico bifacial en diferentes condiciones de prueba y a su vez medir la irradiancia incidente y la temperatura de celda. En la Figura 2, se muestra el trazador de curvas utilizado en el presente estudio.



Figura 2. Trazador de curvas I-V Gossen Metrawatt PROFITEST PV

Irradiancia elevada equivalente

Se aplicó el método de la irradiancia elevada G_e en exteriores, el cual consta de obtener datos de las bifacialidades del módulo fotovoltaico bifacial a través de mediciones de los parámetros fotovoltaicos de lado frontal y reverso de forma independiente. En la Figura 3, se muestra la forma gráfica en la que se tomaron los datos del módulo fotovoltaico bifacial.

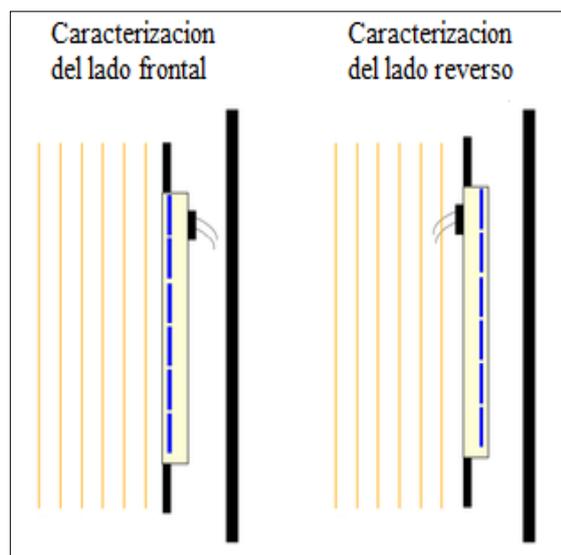


Figura 3. Caracterización del módulo fotovoltaico bifacial, adaptado de IEC 60904-1-2 (2019)

La irradiancia equivalente de un módulo fotovoltaico bifacial se pueden obtener según la norma IEC 60904-1-2:2019 el cual se determinan en función de las bifacialidades.

$$G_e = 1000 \frac{W}{m^2} + \varphi \cdot G_r \quad (1)$$

Donde, G_e es la irradiancia elevada equivalente y G_r es la irradiancia del reverso.

$$\varphi = \text{Min}(\varphi_{Isc}, \varphi_{Pmax}) \quad (2)$$

Siendo el factor de bifacialidad el valor mínimo de la bifacialidad de la potencia máxima y la corriente de cortocircuito.

Para determinar la bifacialidad de corriente de cortocircuito y potencia máxima se realiza mediante una relación de la parte frontal y reverso del módulo fotovoltaico bifacial.

$$\varphi_{Isc} = \frac{\varphi_{Isc, rear}}{\varphi_{Isc, front}} \quad (3)$$

Donde, φ_{Isc} es la bifacialidad de corriente de cortocircuito que esta expresado en porcentaje,

$\varphi_{Isc, rear}$ es la corriente de corto circuito del lado reverso expresado en A y $\varphi_{Isc, front}$ es la corriente de corto circuito del lado frontal expresado en A.

$$\varphi_{Pmax} = \frac{\varphi_{Pmax, rear}}{\varphi_{Pmax, front}} \quad (4)$$

Donde, φ_{Pmax} es la bifacialidad de la potencia máxima que esta expresado en porcentaje, $\varphi_{Pmax, rear}$ es la potencia máxima del lado reverso expresado en W y $\varphi_{Pmax, front}$ es la potencia máxima del lado frontal expresado en W.

Caracterización de la curva I-V en módulos fotovoltaico bifaciales

Para este procedimiento toma como base los datos de operación de la parte frontal del módulo fotovoltaico bifacial, para finalmente obtener la nueva condiciones de BSTC con $G = G_e$ y $T_{cel} = 25^\circ C$ (De la Calle, 2021).

- Corriente de corto circuito

$$I_{sc}(G_e, T_{cel}) = I_{sc,opc} \cdot \frac{G_e}{G_{OPC}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{cel} - T_{cel,OPC})] = I_{sc,BSTC} \quad (5)$$

Donde, $I_{sc}(G_e, T_{cel})$ es la corriente en cortocircuito BSTC en A, $I_{sc,opc}$ es la corriente de cortocircuito de operación en A, G_{OPC} es irradiancia de operación en w/m^2 , α es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito, $T_{cel,OPC}$ es la temperatura de celda de operación y T_{cel} es la temperatura celda en STC de $25^\circ C$.

- Voltaje de circuito abierto

$$V_{oc}(T_{cel}) = V_{oc,OPC} - N_s \cdot \beta (T_{cel} - T_{cel,OPC}) = V_{oc,BSTC} \quad (6)$$

Donde, $V_{oc}(T_{cel})$ es el voltaje de circuito abierto BSTC en V, $V_{oc,OPC}$ es el voltaje de circuito abierto de operación, N_s es el número de celdas, β es el coeficiente de temperatura de voltaje de circuito abierto, $T_{cel,OPC}$ es la temperatura celda de operación en °C y T_{cel} es la temperatura celda en STC en 25°C

- Corriente máxima

$$I_{BSTC} = I_{OPC} + \Delta I_{sc} \quad (7)$$

Donde, I_{BSTC} es la corriente máxima en BSTC en A, I_{OPC} es la corriente de operación en A y ΔI_{sc} es la variación de corriente de corto circuito.

$$\Delta I_{sc} = (I_{sc,BSTC} - I_{sc,opc}) I_{opc} / I_{sc,opc} \quad (8)$$

Donde, ΔI_{sc} es la variación de corriente de corto circuito, $I_{sc,BSTC}$ es la corriente en cortocircuito BSTC en A, $I_{sc,opc}$ es la corriente de cortocircuito de operación en A, I_{OPC} es la corriente de operación en A.

- Voltaje máximo

$$V_{BSTC} = V_{OPC} + \Delta V_{oc} \quad (9)$$

Donde, V_{BSTC} es el voltaje máximo en BSTC en V, V_{OPC} es el voltaje de operación en V y ΔV_{sc} es la variación del voltaje en circuito abierto.

$$\Delta V_{oc} = (V_{oc,BSTC} - V_{oc,opc}) V_{opc} / V_{oc,opc} \quad (10)$$

Donde, ΔV_{sc} es la variación del voltaje en circuito abierto, $V_{oc,BSTC}$ es el voltaje de circuito abierto BSTC en V, $V_{oc,opc}$ es el voltaje de circuito abierto de operación en V, V_{OPC} es el voltaje de operación en V.

- Potencia máxima

$$P_{BSTC} = I_{BSTC} \times V_{BSTC} \quad (11)$$

Donde, P_{BSTC} es la potencia máxima en BSTC en W, I_{BSTC} es la corriente máxima en BSTC en A y V_{BSTC} es el voltaje máximo en BSTC en V.

Ganancia bifacial

La ganancia bifacial es un aumento de potencia que se espera de un módulo fotovoltaico bifacial en comparación con un módulo fotovoltaico monofacial o tradicional con las mismas características del módulo bifacial (Wang et al., 2015).

$$G_{bif} = \frac{P_{BSTC}}{P_{STC}} \quad (12)$$

Donde, G_{bif} es la ganancia bifacial, P_{BSTC} es la potencia máxima en BSTC y P_{STC} es la potencia máxima en STC.

Poder bifacial bi-fi

El poder bifacial bi-fi es la ganancia de potencia que es impulsada por la radiación reversa, siendo este la pendiente del ajuste lineal de G_r con P_{max} , su valor indica ganancia de potencia por unidad de irradiancia reversa y está dado en $W/(Wm^2)$.

Resultados y discusiones

Medida de la curva I-V del módulo fotovoltaico bifacial sin tener en cuenta las bifacialidades

En este proceso se tomaron datos de las curvas I-V con el trazador de curvas sin tener en cuenta la bifacialidades, es decir, sin cubrir la parte reversa del módulo. En la Figura 4, se muestra la manera de toma de datos del lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial.



Figura 4. Módulo fotovoltaico bifacial

En las Figuras 5, se muestra la curva P-V que se encuentra de color azul a condiciones de operación, las curvas I-V de línea roja es a condiciones de operación y la línea morada es a STC.

La Figura 6, se muestran los datos de todo el módulo fotovoltaico bifacial, los cuales fueron obtenidos por el trazador de curvas donde se tuvo una potencia máxima de 397.3W a una irradiancia de $1041 W/m^2$ y una temperatura de celda de 51°C a condiciones de operación. A STC tenemos 421.2W de potencia máxima, 11.12A de corriente máxima y 37.9V de voltaje máximo.

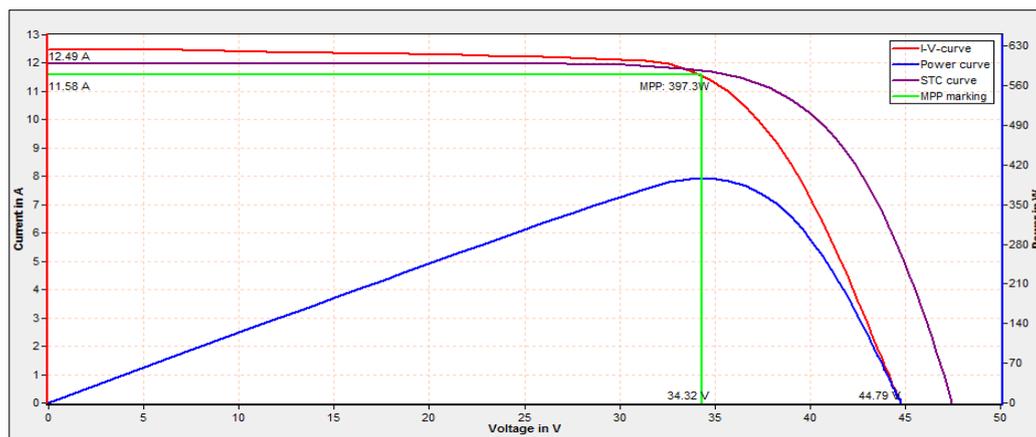


Figura 5. Curvas I-V y P-V de todo el módulo fotovoltaico bifacial

	Measured	@STC	@NOCT	Refer.
Pmax [W,Wp]	397.3	421.2	346.6	405.0
Prange [W]		400-442		405-405
I_{pmax} [A]	11.58	11.12	8.90	9.86
U_{pmax} [V]	34.3	37.9	39.0	41.1
I_{sc} [A]	12.49	12.00	9.60	10.37
U_{oc} [V]	44.8	47.47	47.59	49.1
R_s [Ohm]	0.4	0.4	0.4	0.3
R_p [kOhm]	>0.2	>0.3	>0.4	>0.2
FF [%]	71.0	74.0	75.9	79.6
E_{eff} [W/m²]	1041	1000	800	1000
T_{ref} [DegC]	45.9			
T_{mod} [DegC]	51.0	25.0	43.8	25.0
T_{amb} [DegC]	20.0		20.0	
cT(P) [1/K]	-0.0035	-0.0035	-0.0035	-0.0035
cT(U) [1/K]	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025

Figura 6. Parámetros fotovoltaicos de todo el módulo fotovoltaico bifacial.

Tabla 1. Resultados finales a condiciones STC de todo el módulo fotovoltaico bifacial.

Parámetros	Resultados
P_{max}	421 W
I_{max}	11.1 A
V_{max}	37.9 V
I_{sc}	12 A
V_{oc}	47.4 V

En la Tabla 1, se muestra la obtención de datos de todo el módulo fotovoltaico bifacial medido por el trazador de curvas I-V y se procesaron un total de 24 datos de los cuales se tomaron un promedio.

Para determinar lo coeficientes de bifacialidad se ha cubierto la parte posterior del módulo con una madera triplay de 4mm y pintado de color negro la parte que está cubriendo al módulo. En la Figura 7, se muestra como se ha cubierto con un material no reflectante el lado no expuesto a la irradiación directa para determinar sus bifacialidades.



Figura 7. Cubierta del lado no expuesto para determinar bifacialidades.

Medida de la curva I-V de la parte frontal del módulo fotovoltaico bifacial

En este proceso se tomaron datos de las curvas I-V con el trazador de curvas del lado frontal del módulo. En la Figura 8, se muestra la manera de toma dato del lado frontal del módulo fotovoltaico bifacial.



Figura 8. Lado frontal del módulo fotovoltaico bifacial.

En la Figura 9, se muestran los datos del lado frontal del módulo fotovoltaico bifacial tanto las curvas I-V y los resultados medidos y a STC, los cuales fueron obtenidos por el trazador de curvas donde se tuvo una potencia máxima de 346.6W a una irradiancia de 1049 W/m^2 y una temperatura de celda de 50.8°C . A STC tenemos 364.9W de potencia máxima, 9.79A de corriente máxima y 37.7 V de voltaje máximo.

	Measured	@STC	@NOCT	Refer.
Pmax [W,Wp]	346.6	364.9	301.9	405.0
Prange [W]		347-383		405-405
Ipmax [A]	10.26	9.79	7.83	9.86
Upmax [V]	33.8	37.3	38.6	41.1
Isc [A]	11.01	10.50	8.40	10.37
Uoc [V]	44.5	47.07	47.26	49.1
Rs [Ohm]	0.5	0.4	0.5	0.3
Rp [kOhm]	>0.2	>0.3	>0.4	>0.2
FF [%]	70.8	73.8	76.0	79.6
Eeff [W/m2]	1049	1000	800	1000
Tref [DegC]	43.7			
Tmod [DegC]	50.8	25.0	43.5	25.0
Tamb [DegC]	20.0		20.0	
cT(P) [1/K]	-0.0035	-0.0035	-0.0035	-0.0035
cT(U) [1/K]	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025

Figura 9. Parámetros fotovoltaicos del lado frontal.

la Figuras 10, se muestra la curva P-V que se encuentra de color azul a condiciones de operación, las curvas I-V de línea roja es a condiciones de operación y la línea morada es a STC, todo ello solo del lado frontal.

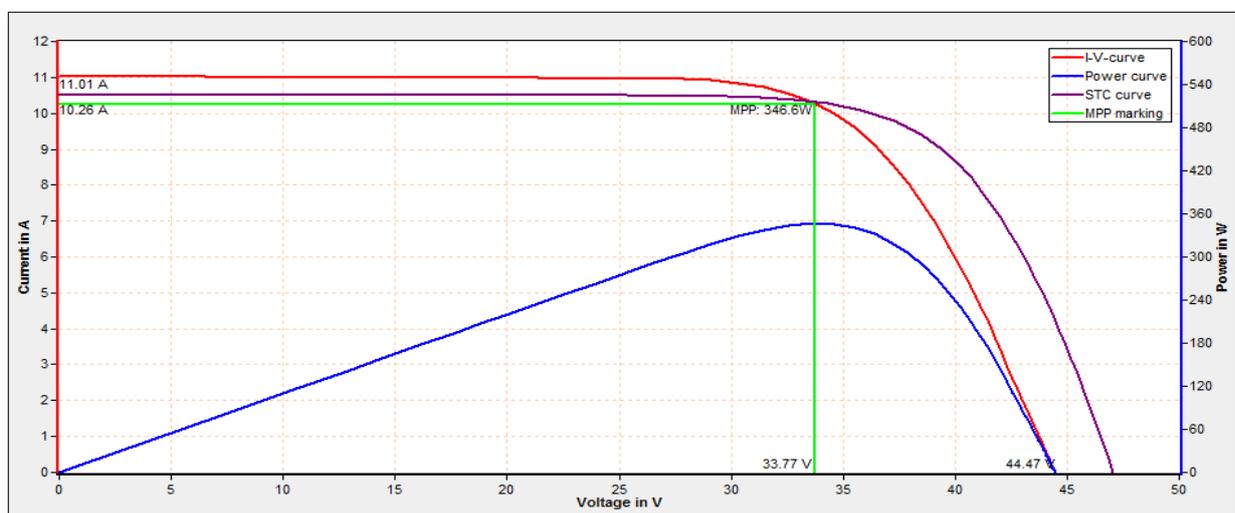


Figura 10. Curvas I-V y P-V de lado frontal del módulo fotovoltaico bifacial.

Medida de la curva I-V del lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial

En este proceso se tomaron datos de las curvas I-V con el trazador de curvas del lado reverso del módulo. En la Figura 11, se muestra la manera de toma de datos del lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial.



Figura 11. Lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial.

En la Figura 12, se muestran los datos del lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial, los cuales fueron obtenidos por el trazador de curvas donde se tuvo una potencia máxima de 233.7W a una irradiancia de 1049 W/m^2 y una temperatura de celda de 50.8°C. A STC tenemos 242.7W de potencia máxima, 6.18A de corriente máxima y 39.3 V de voltaje máximo.

	Measured	@STC	@NOCT	Refer.
Pmax [W,Wp]	233.7	242.7	190.3	405.0
Prange [W]		231-255		405-405
I_{pmax} [A]	6.49	6.18	4.94	9.86
U_{pmax} [V]	36.0	39.3	38.5	41.1
I_{sc} [A]	7.34	7.00	5.60	10.37
U_{oc} [V]	44.3	46.91	46.08	49.1
R_s [Ohm]	0.6	0.6	0.7	0.3
R_p [kOhm]	>0.3	>0.3	>0.4	>0.2
FF [%]	71.9	74.0	73.8	79.6
E_{eff} [W/m²]	1049	1000	800	1000
T_{ref} [DegC]	42.6			
T_{mod} [DegC]	50.8	25.0	43.5	25.0
T_{amb} [DegC]	20.0		20.0	
cT(P) [1/K]	-0.0035	-0.0035	-0.0035	-0.0035
cT(U) [1/K]	-0.0025	-0.0025	-0.0025	-0.0025

Figura 12. Parámetros fotovoltaicos del lado reverso.

Las Figuras 13, se muestra la curva P-V que se encuentra de color azul a condiciones de operación, las curvas I-V de línea roja es a condiciones de operación y la línea morada es a STC, todo ello solo del lado reverso.

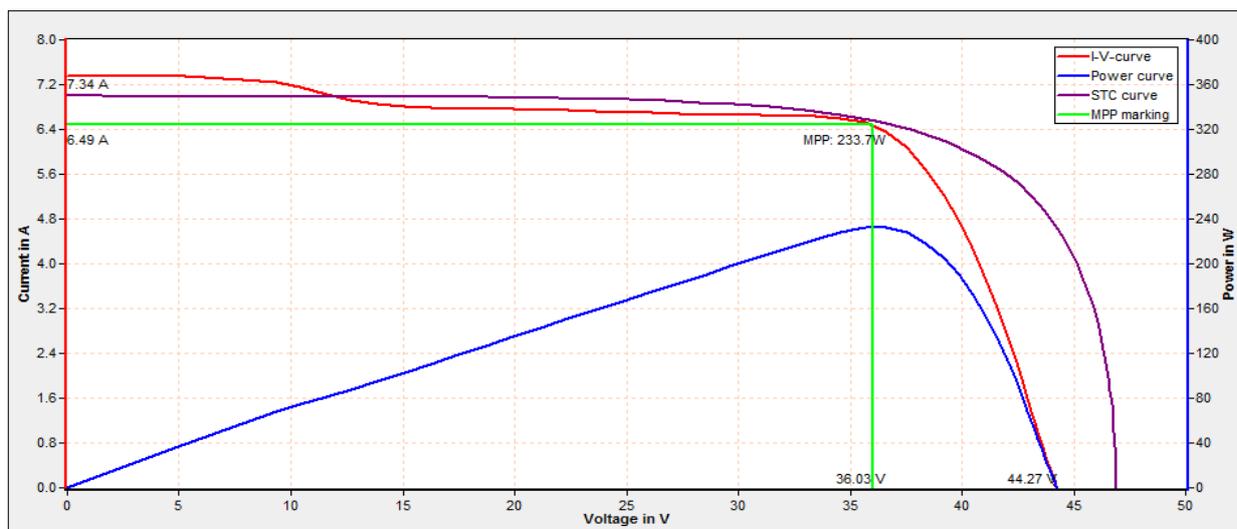


Figura 13. Curvas I-V y P-V de lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial

En la curva I-V de color rojo que es a condiciones de operación medidos de la Figura 13, se puede observar una curva I-V un tanto irregular esto es debido a un ligero sombreado de las partes laterales que provoca la base del módulo fotovoltaico bifacial que se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Sombreamientos laterales parciales.

Resultados finales por el método de irradiancia elevada G_e en exteriores

Se tomaron un total de 24 muestras de datos de los cuales se tomaron los valores promedio para su posterior análisis y resultados finales. En la Tabla 2, se muestran los resultados finales y datos más relevantes de la investigación realizada.

Tabla 2.
Resultados finales obtenidos.

Parámetros	Resultados
φ_{isc}	0.67
φ_{Pmax}	0.66
φ	0.66
G_r	236 W/m^2
G_e	1155 W/m^2
$I_{sc,BSTC}$	11.94 A
$V_{oc,BSTC}$	49.11 V
I_{BSTC}	11.11 A
V_{BSTC}	37.47 V
P_{BSTC}	416.49 W
P_{STC}	363.90 W
G_{bif}	14.44%

En comparación con la Tabla 1 que tiene una potencia máxima de 421W cuyos datos fueron obtenidos por el trazador de curvas I-V y el método de irradiancia equivalente elevada G_e en exteriores la potencia máxima es de 416.47W, mostrando datos muy similares, lo cual demuestra que el método aplicado muestra resultado coherentes y válidos.

La ganancia bifacial nos muestra que del total de 416.47W que puede generar el modulo fotovoltaico bifacial a BSTC, el 14.44% es entregada por la parte reversa del módulo fotovoltaico. En la Figura 15, nos muestra el ajuste lineal de G_r con P_{max} , siendo el valor de la pendiente el valor del poder bifacial bi-fi que es de 0.2228.

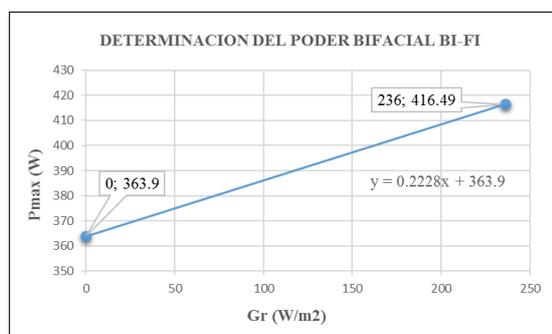


Figura 15. Determinación del poder bifacial bi-fi

$$bi - fi = 0.2228$$

Ya obtenidos los resultados a los que se llegaron durante la investigación, se reconoce una excelente capacidad de la irradiancia que se capta por la parte inferior del módulo que es un promedio de $236 W/m^2$ y esto es debido al albedo del suelo que está compuesto por mayólica de color gris brillante y la altura de la estructura del módulo es de 1.25m desde el suelo hasta la parte más cercana al suelo del módulo. La máxima potencia promedio del lado frontal es de 363.90W y la del lado reverso de 239.5W teniendo en cuenta que el sombreado lateral de la

base del propio modulo causo dificultad para las mediciones ya que solo se puede trazar curvas I-V a SCT alrededor del mediodía donde se evita el aumento de sombras laterales, con esos datos se obtiene un factor de bifacialidad de 0.66 lo cual ocasiona que la irradiancia equivalente G_e sea de $1155 W/m^2$.

La ganancia bifacial obtenida de 14.44% muestran datos muy atractivos acerca de los módulos fotovoltaicos bifaciales, teniendo en cuenta que según su ficha técnica indica que pueden llegar a alcanzar hasta un 25% de ganancia bifacial en BSTC. De la misma forma el factor del poder bi-fi con un valor muy favorable de 0.2228 lo cual indica la gran capacidad de lo modulo fotovoltaico bifaciales para poder aprovechar la radiación reflejada y difusa.

En España se realizó investigaciones similares realizados por De la Calle (2021), quien evaluó módulos fotovoltaicos bifaciales de 400W de la marca LG teniendo como resultado una ganancia bifacial de 11.5% bajo una superficie reflectante de hierba verde con una irradiancia reversa de $135W/m^2$ y un factor de bifacialidad de 0.651.

Conclusiones

Caracterizar lo módulos fotovoltaicos bifaciales a partir de las bifacialidades y el método de la irradiancia equivalente nos permite conocer la ganancia bifacial o ganancia de potencia impulsada por la irradiancia en el lado reverso del módulo fotovoltaico bifacial, donde se llega a la conclusión de que en un solo modulo fotovoltaico bifacial de 405W se llega a tener una ganancia bifacial de 14.44% un factor de poder bi-fi de 0.2228 son resultados muy favorables y demuestran las grandes ventajas de mayor generación de potencia y energía frente a los módulos fotovoltaicos tradicionales o monofaciales.

Referencias bibliográficas

- De la Calle, R. (2021). *Caracterización de curvas I-V en paneles fotovoltaicos bifaciales* [Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/47961>
- IEC 60904-1-2. (2019). *Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices*.
- Kenny, R. P., Garcia Menendez, E., Lopez-Garcia, J., & Haile, B. (2018). Characterizing the operating conditions of bifacial modules. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5049253>
- Shoukry, I., Libal, J., Kopecek, R., Wefringhaus, E., & Werner, J. (2016). Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules. *Energy Procedia*, 92, 600–608. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.025>
- Tartaglia, A. (2019). *Tecnología fotovoltaica con paneles bifaciales: ¿vuelve para quedarse?* [Universidad Politecnica de Cartagena]. <http://hdl.handle.net/10317/8009>
- Vargas, T., & Abrahamse, A. (2014). Trazador de curvas I-V de código abierto para monitoreo de rendimiento de paneles fotovoltaicos en Bolivia. *Scielo*. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312014000100007&lang=es
- Wang, S., Wilkie, O., Lam, J., Steeman, R., Zhang, W., Khoo, K. S., Siong, S. C., & Rostan, H. (2015). Bifacial Photovoltaic Systems Energy Yield Modelling. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.060>