

## Artículo original

# Desempeño energético de paneles solares semitransparentes en un entorno tropical de altura: estudio en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, durante agosto–noviembre de 2025, Chachapoyas

## Energy Performance of Semi-Transparent Solar Panels in a High-Altitude Tropical Environment: A Study at the Toribio Rodríguez de Mendoza National University, Amazonas, During august–november 2025, Chachapoyas

Fernando I. Espinoza-Canaza\*  Homar Santillán-Gómez 

Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.

**\*Autor de correspondencia:**  
Fernando I. Espinoza Canaza,  
email:  
[fernando.espinoza@untrm.edu.pe](mailto:fernando.espinoza@untrm.edu.pe)

**Historial del artículo**  
Recibido: 06 de marzo del 2026  
Aceptado: 13 de mayo del 2026  
Publicado: 20 mayo del 2026

### RESUMEN

La transición hacia energías limpias demanda el uso de tecnologías emergentes como los paneles solares semitransparentes (TSPV); sin embargo, existe una brecha de investigación sobre su desempeño real en entornos tropicales de altura como Chachapoyas que está a 2232,46 m.s.n.m, caracterizados por alta nubosidad y humedad. La hipótesis formulada fue que el rendimiento energético del panel TSPV está determinada por su interacción directa con las condiciones climáticas predominantes (radiación, temperatura, humedad y viento) de la ciudad de Chachapoyas. En el material de estudio, se utilizó un panel solar semitransparente de 130 W (modelo I-ESF-M-M156-24-130W) con un área de campo solar de 0,592 m<sup>2</sup>. El método utilizado para la investigación fue no experimental, cuantitativa y longitudinal de cuatro meses (agosto-noviembre 2025) basada en la Norma UNE-EN-IEC 61724-1. Se empleó una estación meteorológica Davis Vantage Pro2, un piranómetro EKO MS-711 y dataloggers Arduino para realizar mediciones cada 5 min. Se registró un promedio de 3,24 HSP y un rendimiento final (YF) de 2,99 h. El sistema alcanzó un factor de rendimiento (PR) de 92,22 %, indicando un alto desempeño operativo. Las pérdidas externas (suciedad o temperatura) fueron mínimas (1,05 %), mientras que las pérdidas del sistema por la ineficiencia del inversor fueron del 6,73 %. El sistema opera con alto rendimiento en Chachapoyas. El alto PR confirma que las pérdidas de captura son insignificantes, identificándose la conversión DC/AC del inversor como la principal limitante técnica. El diseño de la instalación logró maximizar la captación del recurso solar disponible.

**Palabras clave:** Energía, Fotovoltaico, Rendimiento, Semitransparente, Solar.

### ABSTRACT

The transition toward clean energy requires the adoption of emerging technologies such as semitransparent solar panels (TSPV). However, there is a research gap regarding their actual performance in high-altitude tropical environments such as Chachapoyas, located at 2232,46 m above sea level and characterized by high cloudiness and humidity. The hypothesis proposed that the energy performance of the TSPV panel is directly determined by its interaction with the prevailing climatic conditions of the city of Chachapoyas, including solar radiation, temperature, humidity, and wind. Regarding the study materials, a 130 W semitransparent solar panel (model I-ESF-M-M156-24-130W) with a solar field area of 0,592 m<sup>2</sup> was used. The research method was non-experimental, quantitative, and longitudinal over a four-month period (August–November 2025), based on the UNE-EN-IEC 61724-1 standard. A Davis Vantage Pro2 meteorological station, an EKO MS-711 pyranometer, and Arduino dataloggers were employed to perform measurements every five minutes. An average of 3.24 peak sun hours (PSH) and a final yield (YF) of 2,99 h were recorded. The system achieved a performance ratio (PR) of 92,22 %, indicating high operational efficiency. External losses (such as dirt or temperature effects) were minimal (1,05 %), while system losses due to inverter inefficiency reached 6,73 %. The system operated with high performance under the climatic conditions of Chachapoyas. The high PR confirmed that capture losses were negligible, identifying the inverter's DC/AC conversion process as the main technical limitation. The installation design successfully maximized the utilization of the available solar resource.

**Keywords:** Energy, Photovoltaic, Performance, Semi-transparent, Solar.

## INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles vinieron impulsando la expansión de la economía global (Guo & Hu 2026), lo que demanda la urgente necesidad de transitar hacia fuentes de energía limpia (TSPV) (Bergren et al., 2021). Las células fotovoltaicas es una de las tecnologías más prometedoras en el sector de la energía renovable (Zang et al., 2025), las brechas de investigación y el potencial futuro de las tecnologías impulsan al desarrollo de la energía solar para acelerar los esfuerzos globales de sostenibilidad y descarbonización (Tibebu Gebreabe et al., 2025). La tecnología STPV está ganando cada vez más atención en aplicaciones debido a su doble función: generar electricidad y permitir la transmisión de luz suficiente en ambientes y en crecimiento de las plantas (Gholami et al., 2025), y representan una alternativa prometedora para la integración urbana de energía solar (Sagar Gupta et al., 2022).

Diversos estudios coinciden en que variables climáticas como la irradiancia solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la nubosidad (Nespoli et al., 2022), influyen directamente en el rendimiento de los TSPV, y provoca pérdidas en eficiencia de conversión energética (Zhao et al., 2022), cada aumento de 1 °C por encima de los 25 °C, puede reducir entre 0,3 a 0,5 % la eficiencia de una celda solar orgánica (Yoo et al., 2023). La humedad relativa del aire es otro factor crítico, esto puede influir negativamente en el desempeño fotovoltaico, dado que genera condensación sobre las superficies (Wang et al., 2019).

Y, en investigaciones aplicadas en contextos urbanos europeos y asiáticos se demostró que, los paneles transparentes funcionan aceptablemente bajo radiación difusa, sin embargo, la eficiencia cae significativamente por las condiciones de radiación (Zhao et al., 2022), y los resultados mostraron que los TSPV generaban alcanzando eficiencia de 4,1 % en promedio (Bergren et al., 2021).

En investigaciones recientes se evaluó el desempeño de celdas solares transparentes basadas en perovskitas semitransparentes, la eficiencia de conversión energética fue 7,3 % con un 30 % de transmisión visible (Yoon, et al., 2017), en otras investigaciones se destacó que, si la eficiencia era menor en comparación con celdas opacas, los TSPV presentaban un equilibrio entre generación energética y transparencia, logrando el 13,7 % y 27 % en transparencia, 15,72 % y 24,7 % en transparencia, 11,74 % y 23 % en transparencia (Mondal et al., 2025).

En otros estudios basados en óxido de indio y estaño (ITO), la eficiencia promedio fue de 5,8 % bajo radiación solar directa y 3,9 % en condiciones de nubosidad (Liao et al., 2020), sin embargo, los parámetros ambientales afectan la eficiencia (Montes-Romero et al., 2026). En otra investigación en Colombia bajo las condiciones climáticas comparables a Chachapoyas, su eficiencia energética en los seis meses, fue de 5,3 % en promedio, con variaciones significativas durante días nublados la eficiencia cayó hasta 3,1 % (Rincón, et al., 2023). En regiones tropicales de altitud como Chachapoyas, la alta nubosidad

y la presencia de nieblas matinales reducen la irradiancia directa en los paneles solares, llegando la radiación solar en promedio diaria entre 3,5 y 5,0 kWh/m<sup>2</sup> (Espinoza et al., 2021). Y, en el caso específico de la ciudad de Chachapoyas, las condiciones climáticas se caracterizan por una alta frecuencia de nubosidad, elevada humedad relativa y una radiación solar que varía significativamente a lo largo del año (Espinoza-Ramirez, 2023).

Las características climáticas de Chachapoyas lo convierten en un entorno propicio para evaluar el comportamiento real de tecnologías fotovoltaicas semitransparentes, este vacío de conocimiento limita actualmente la toma de decisiones técnicas y políticas respecto a la implementación de tecnologías solares avanzadas como los paneles solares (Liu et al., 2020) y sostenible en la región (Chandrasekaran et al., 2022), no favoreciendo la transición energética local hacia fuentes limpias y sostenibles (Kashfia Rahman et al., 2024).

Por ello, es esencial evaluar la eficiencia energética de estos dispositivos en escenarios reales como el que ofrece Chachapoyas, como resultados la investigación podría ofrecer información valiosa para el desarrollo científico local y para la planificación energética sostenible en regiones similares.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ámbito de estudio

La investigación se realizó en las instalaciones del *Laboratorio de Investigación en Climatología y Energías Renovables – LICER*, localizado a una altitud de 2232,46 m s.n.m., y cuya coordenada de ubicación son 6° 14'03''S, 77° 51'16'' W, localizado en el campus de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas – UNTRM, Chachapoyas, Amazonas (Figura 1).

### Población y muestra

La población del estudio estuvo conformada por una unidad de análisis, es decir un único panel solar semitransparente, instalado en la azotea de las instalaciones de LICER en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza en Chachapoyas, Amazonas.

### Métodos, técnicas e instrumentos

Los procedimientos para el análisis del rendimiento energético de los paneles solares, se realizaron bajo la Norma Técnica (UNE-EN-IEC61724-1, 2022), dentro de esta norma se detallan los procedimientos de análisis metodológico específicamente para evaluar paneles solares.

**Panel solar semitransparente:** El objeto de estudio fue el modelo del panel solar semitransparente utilizado en el estudio es el modelo I-ESF-M-M156-24-130W, cuyas características y especificaciones se detallan en la tabla 1.

Está integrado por 24 celdas solares, cuyas dimensiones son 157 mm x 157 mm, con área total de 0,592 m<sup>2</sup> del campo solar, siendo el área total transparente 0,222 m<sup>2</sup> (Figura 2). El estudio

se centró en el área del campo solar, es decir donde índice la energía de la radiación solar.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del panel solar semitransparente.

Modelo: I-ESF-M-M156-24-130W		
Rated Power (Pmpp)	W	130,00
Tolerance	W	+ 5 %
Rated Voltage (Pmpp)	V	13,80
Rated Current (Impp)	A	9,42
Open circuit (Voc)	V	16,25
Short Circuit (Isc)	A	9,91
Weight	Kg	18,00
Size	mm	1100*740*9
Power Specifications	STC	E=1000 W/m2 TC=25°C Am=1,5

Está integrado por 24 celdas solares, cuyas dimensiones son 157 mm x 157 mm, con área total de 0,592 m<sup>2</sup> del campo solar, siendo el área total transparente 0,222 m<sup>2</sup> (Figura 2). El estudio se centró en el área del campo solar, es decir donde índice la energía de la radiación solar.

### Estructura para el montaje del Panel solar Semitransparente

Para el montaje del panel solar semitransparente, se diseñó una estructura metálica orientada al norte con inclinación de 25°, para que la radiación solar con respecto al ecuador incida perpendicularmente y se tenga la mayor captación de radiación solar. En la figura 3, se muestra la estructura metálica y en la figura 4 el montaje de los componentes: panel solar semitransparente, el controlador de carga, inversor y los interruptores termomagnéticos de control.



Figura 1. Ámbito de estudio – Centro de investigación en climatología y energías alternativas.

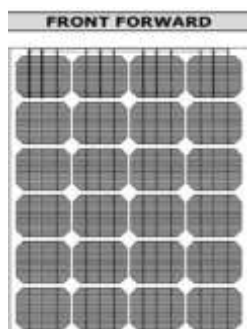


Figura 2. Panel solar semitransparente (TSPV).

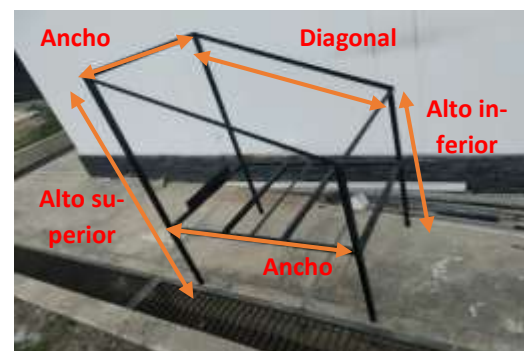


Figura 3. Estructura metálica para el montaje del panel solar.



**Figura 4.** Montaje del sistema del panel solar y componentes en la estructura metálica.

#### Instrumentos:

**Estación meteorológica:** Los datos meteorológicos (temperatura ambiente, humedad, precipitación, velocidad del viento) se obtuvieron de la estación meteorológica automática Davis, modelo Vantage Pro2 del INDES-CES, en intervalos de espectro radiómetro EKO MS-711, localizado en la azotea del LICER a unos 5 m de donde está ubicado el panel solar semitransparente.

**Temperatura en las celdas del panel solar:** Se utilizaron dos sensores digitales de temperatura modelo DS18B20, uno colocado debajo de la celda solar y el otro en el área transparente del módulo del panel solar semitransparente.

**Sensor de luminosidad (luz):** Sensor de iluminación digital BH1750, este sensor permitió realizar mediciones de flujo lumínico o iluminancia a través del bus I2C. Se ubicó por debajo del módulo del panel solar semitransparente en el área translúcida para captar el nivel de luminosidad solar. Este sensor BH1750 registra la intensidad luminosa directamente en unidades Lux (lx). Equivale a un lumen /m<sup>2</sup>. Utilizado en la fotometría como medida de la luminancia, tomando las diferentes longitudes de onda según la luminosidad.

**Registro de datos (Datalogger):** Para el registro de los datos de temperatura en las celdas solares y en el área translúcida del panel y la luminosidad se utilizó un microcontrolador Arduino Uno R3 con un datalogger modelo Shield Datalogger v1.0, dotado de una memoria Micro SD de 32 Gb y una fuente de alimentación de 9 V. Estos dispositivos se ubicaron en una cabina de plástico transparente por debajo del panel solar.

#### Procedimiento:

##### Recolección de datos meteorológica

- Los datos registrados se obtuvieron de la estación meteorológica Vantage Pro2: temperatura ambiente, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento.
- Los datos se organizaron en intervalos de 5 min, desde las 7:00 – 17:00 h.
- El registro de datos se efectuó por fecha y horas del día.
- Las temperaturas en la celda solar y la luminosidad se registraron con el mismo intervalo de tiempo que la estación meteorológica.

##### Registro energético.

- La medición y registro de datos de la generación energética: voltaje y corriente continua del panel solar semitransparente, se realizó cada cinco minutos, con el sensor INA 229, sincronizando el mismo intervalo de tiempo que la estación meteorológica. Esta sincronización del registro de datos permitió correlacionar los datos, en horas, días y condición específica del día: nublado, parcialmente nublados y soleado.

##### Análisis de datos

- Se sinceró y organizó los datos registrados en tablas comparativas.
- Como parte del análisis de datos, se generaron gráficos de dispersión y se aplicó análisis estadísticos para determinar la correlación lineal (ecuación lineal) entre las variables climática y la generación energética.
- Se interpretaron los patrones de variación energética y eficiencia en función de las variaciones o cambios ambientales - climáticos.

#### Metodología para para la evaluación energética y rendimiento

Para la evaluando del “rendimiento energético” de los paneles solares semitransparentes bajo las condiciones climáticas ambientales en Chachapoyas, Amazonas”, se tomó la Norma Técnica IEC 61724-1 que es la referencia normativo interna-

cional para procesar los datos para obtener indicadores confiables de desempeño, como la eficiencia, "performance ratio", así como pérdidas por ensuciamiento, rendimiento y eficiencia.

- **Cálculo 1 - Voltaje DC Instantáneo ( $V_{MPP}$ ).** El Voltaje en el punto de máxima potencia  $V_{MPP}$  de un módulo fotovoltaico se ajusta principalmente por la temperatura en la celda solar. La dependencia con la radiación es mínima y a menudo se ignora en este cálculo, pero se utilizó el coeficiente de temperatura de tensión para realizar la corrección.

$$V_{MPP}(T_c) = V_{MPP,STC} \times [1 + \beta \times (T_c - T_{c,STC}^*)]$$

**Donde:**

$V_{MPP,STC}$ : Voltaje nominal del panel solar.

$T_c$ : Temperatura instantánea de la celda.

$T_{c,STC}^*$ : Temperatura STC, 25 °C.

$\beta$ : Es el coeficiente de temperatura de tensión, %/°C.

- **Cálculo 2: Corriente DC Instantánea ( $I_{MPP}$ ).** Es la corriente en el punto máximo de potencia del módulo fotovoltaico, que es altamente dependiente de la radiación solar y solo ligeramente afectada por la temperatura de la celda solar. Se utilizó el coeficiente de temperatura de la corriente  $\alpha$  proporcionado por el fabricante del panel solar. La ecuación que describe la corriente instantánea ajustada, según la metodología de la UNE-ENIEC 61724-1, es:

$$I_{MPP}(G, T_c) = I_{MPP,STC} \times \frac{G}{G_{STC}^*} \times [1 + \alpha \times (T_c - T_{c,STC}^*)]$$

**Donde:**

G: Radiación solar instantánea (W/m<sup>2</sup>).

$G_{STC}^*$ : Radiación STC (1000 W/m<sup>2</sup>).

$T_c$ : Temperatura instantánea de la celda solar (°C).

$T_{c,STC}^*$ : Temperatura STC, 25 °C.

$\alpha$ : Es el coeficiente de temperatura de corriente (%/°C).

- **Cálculo 3: Potencia DC Instantánea ( $P_{MPP}$ ).** Es la potencia DC máxima producto de los dos valores, voltaje DC y corriente DC instantánea. Esta es la potencia que el panel genera bajo las condiciones ambientales registradas, definida por la ecuación:

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP}$$

**Donde:**

$P_{MPP}$ : Potencia instantánea (W).

$V_{MPP}$ : Voltaje instantánea del panel solar (V).

$I_{MPP}$ : Corriente instantánea del panel solar (A).

- **Cálculo 4: Potencia DC instantánea.** Metodológicamente, representa el mismo valor físico que la potencia DC. Sin embargo, la Norma UNE-ENIEC 61724-1 a menudo utiliza la fórmula única de corrección de potencia como la métrica primaria para el rendimiento de referencia.

$$P_{MPP}(G, T_c) = P_{MPP,STC} \times \frac{G}{G_{STC}^*} \times [1 + \gamma \times (T_c - T_{c,STC}^*)]$$

**Donde:**

$P_{MPP,STC}$ : Es la potencia nominal STC del panel solar (130 W).

G: Radiación solar instantánea (W/m<sup>2</sup>).

$G_{STC}^*$ : Radiación STC (1000 W/m<sup>2</sup>).

$T_c$ : Temperatura instantánea de la celda solar (°C).

$T_{c,STC}^*$ : Temperatura STC, 25 °C.

$\gamma$ : Es el coeficiente de temperatura de la potencia (%/°C).

- **Cálculo 5: Potencia AC instantánea ( $P_{AC}$ ).** La potencia que el inversor entrega a la red o a la carga, depende de la potencia DC de entrada y de la eficiencia del inversor. Para el cálculo de la potencia AC, se tomó los datos contenidos en el datasheet del inversor, cuya eficiencia es  $\eta = 93,2 \%$ .

$$P_{AC,Ref} = P_{DC,Ref} \times \eta_{max}$$

**Donde:**

$P_{AC,Ref}$ : Es la potencia nominal del inversor (500 W).

$P_{DC,Ref}$ : Es la potencia DC generada por el panel solar.

$\eta_{max}$ : Es la eficiencia máxima del inversor  $\eta = 93,2 \%$ .

- **Cálculo 6: Potencia AC de referencia ( $P_{AC, Ref}$ ).** Viene a ser la potencia DC teórica (ajustada por la norma) y se reduce el 6,8 % por las pérdidas de conversión del inversor (cuando,  $\eta=93,2 \%$ ). Este valor es la potencia AC que el sistema fotovoltaico entrega a la red, sirviendo como la métrica principal de rendimiento AC.

**Conversión de potencia a energía.** Cuando se integra una lectura instantánea potencia (P) o irradiancia (G) a lo largo de un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , se convierte en energía (E) o Irradiancia integrada (H). La ecuación de conversión es:

$$E(Wh) = \sum P(W)x \frac{\Delta_t(\text{min})}{60\left(\frac{\text{min}}{h}\right)}$$

Dado que  $\Delta t = 1$  min, y el factor de corrección es  $1/60$  h.

**Rendimiento final/día ( $Y_F$ ).** Corresponde cuando el sistema generó el equivalente a las horas de operación de la potencia nominal (130 W), este valor representa para un día de operación del sistema de panel solar, determinándose con la ecuación:

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{MPP,STC}}$$

**Donde:**

$Y_F$ : Es el rendimiento diario del sistema.

$E_{AC}$ : Es la energía AC.

$P_{MPP,STC}$ : Es la energía solar en  $W/m^2$ .

**Rendimiento de referencia ( $Y_R$ )**

Es el rendimiento del recurso solar recibido, es decir las horas de Sol Pico (HSP) disponible en el transcurso del día. Este valor es físicamente coherente para un día de medición de 7:00 - 17:00 h.

$$Y_R = \frac{H_I}{G^*_{STC}}$$

**Donde:**

$Y_R$ : Es el rendimiento de referencia diario del sistema.

$H_I$ : Es a energía solar acumulada durante el día o en un determinado periodo.

$G^*_{STC}$ : Es la energía solar STC que equivale a  $1000 W/m^2$ .

**Factor de Rendimiento ( $P_R$ ).** El factor de rendimiento, indica que el sistema está operando con una eficiencia excelente, muy cerca de la eficiencia máxima del inversor 93,2 %, también indica que no hay grandes pérdidas secundarias (cableado, suciedad entre otros) en la métrica total del día. Caso contrario, en caso que esté por debajo del 70 %, el sistema tiene pérdidas significativas de potencia.

$$P_R = \frac{Y_F}{Y_R}$$

**Donde:**

$P_R$ : Es el factor de rendimiento.

$Y_F$ : Es el rendimiento final en un determinado periodo.

$Y_R$ : Es el rendimiento final de referencia.

**Rendimiento de Arreglo ( $Y_A$ ).** Mide la energía DC generada por el panel solar (antes de la etapa del inversor) por unidad de potencia nominal. Este valor debe ser mayor que el  $Y_{F(AC)}$  porque incluye la energía que el inversor pierde en la conversión.  $Y_A$ , se puede calcular revirtiendo la eficiencia del inversor a partir del rendimiento final  $Y_F$ , según la ecuación:

$$Y_A = \frac{Y_F}{\eta_{max}}$$

**Donde:**

$Y_A$ : Es el rendimiento final del arreglo.

$Y_F$ : Es el rendimiento final.

$\eta_{max}$ : Es la eficiencia máxima del inversor según referencia del dataseheet.

**Pérdidas de captura ( $L_C$ ).** Las Pérdidas de captura ( $L_C$ ) indican la energía perdida por el panel solar debido a factores externos al inversor, principalmente: temperatura de la celda ( $T_c$ ) y suciedad, sombreado (Soiling), la ecuación que define  $L_C$ , es:

$$L_C = Y_R - Y_A$$

**Donde:**

$L_C$ : es la pérdida por factores externos.

$Y_R$ : Es el rendimiento final del arreglo.

$Y_A$ : Es el rendimiento final.

**Pérdidas del Sistema ( $L_S$ ).** Las Pérdidas del Sistema ( $L_S$ ), indican la energía perdida después del panel, principalmente en la conversión DC/AC, las pérdidas menores en el cableado DC/AC y componentes de protección, por lo que las pérdidas del sistema son el componente dominante de la ineficiencia total.

$$L_S = Y_A - Y_F$$

**Donde:**

$L_C$ : es la pérdida del sistema.

$Y_A$ : Es el rendimiento final del arreglo.

$Y_F$ : Es el rendimiento final.

Los procedimientos de tratamiento y análisis de datos, según la Norma UNE-ENIEC 61724-1, permite cerrar el balance energético, según la ecuación:

$$Y_R = Y_F + L_C + L_S$$

## RESULTADOS

### Comportamiento del voltaje DC instantánea ( $V_{MPP}$ )

En la figura 5 se puede ver que la incidencia de la radiación solar no tiene tanto impacto en la generación del voltaje, según la figura el voltaje oscila entre 13,79 a 13,81 V, lo que demuestra que la radiación solar no influye, esto se puede ver en el intervalo de 11:00 a 14:00 h, el voltaje no varía significativamente, se mantiene casi constante a pesar que la radiación solar oscila entre 500 a 900 W/m<sup>2</sup>.

#### Comportamiento de la corriente DC instantánea (I<sub>MPP</sub>)

El resultado obtenido de la corriente I<sub>MPP</sub> será esencialmente impulsado por el nivel de radiación solar (G). Cuando (G) es cero (noche), la I<sub>MPP</sub> es cero. Cuando G = 1000 W/m<sup>2</sup> y T<sub>c</sub> = 25 °C, la I<sub>MPP</sub> alcanza alrededor de 9,00 A. Este resultado es razonable y físicamente consistente, la corriente generada depende del número de fotones absorbidos (radiación), y la temperatura tiene un efecto menor, pero medible, tal como se muestra en la figura 6.

#### Comportamiento de la Potencia DC Instantánea (P<sub>MPP</sub>)

En la figura 7, se observa que el comportamiento de la potencia generada por el panel solar, tiene relación directa y es proporcional a la incidencia de la radiación solar. En el intervalo entre las 11:00 a 14:00 h, los picos de potencia de la radiación solar se han generado con mayor intensidad y el mismo comportamiento tiene la corriente, con lo que se demuestra que a cielo despejado tanto la corriente como la potencia dependen del comportamiento y de las condiciones de la radiación solar.

#### Comportamiento de la radiación solar – Horas Solar Pico (HSP).

El comportamiento de la radiación solar es muy fluctuante como se puede ver en la figura 8, esto es ocasionado principalmente por el modo como se presentan las condiciones ambientales de día, particularmente en Chachapoyas se presentan nubosidad y precipitación en los intervalos de 12:30 – 14:00 h, lo que puede notarse en la figura 8, este comportamiento es propia del lugar geográfico por las condiciones topográficas.

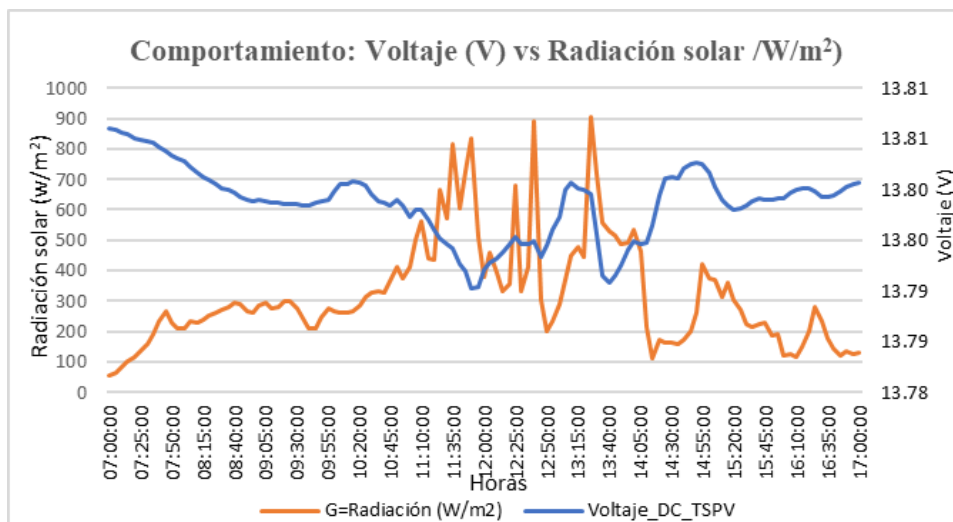


Figura 5. Comportamiento del voltaje y la radiación solar.

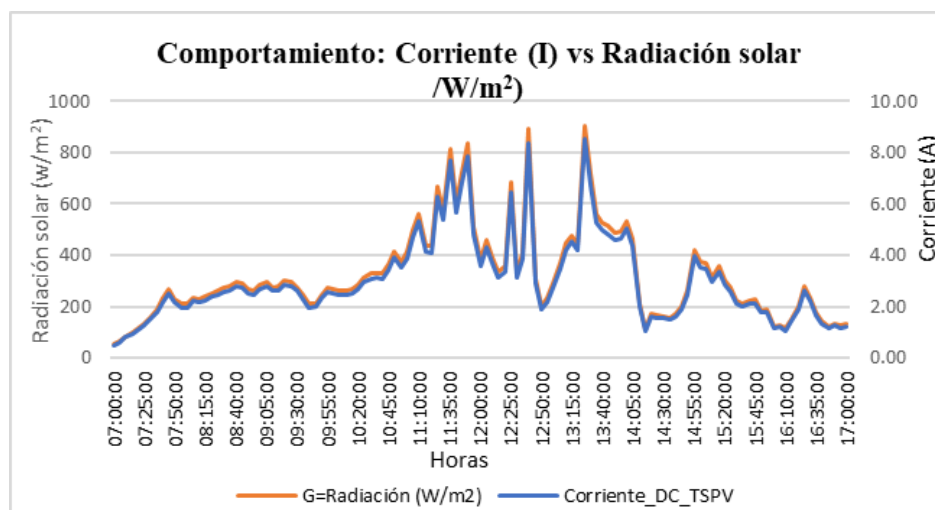
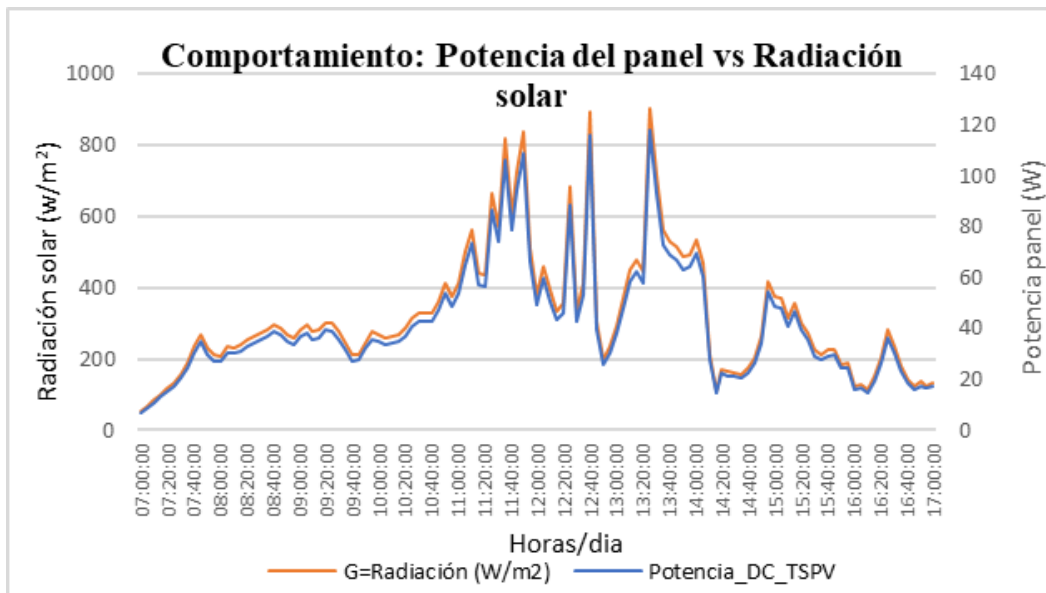
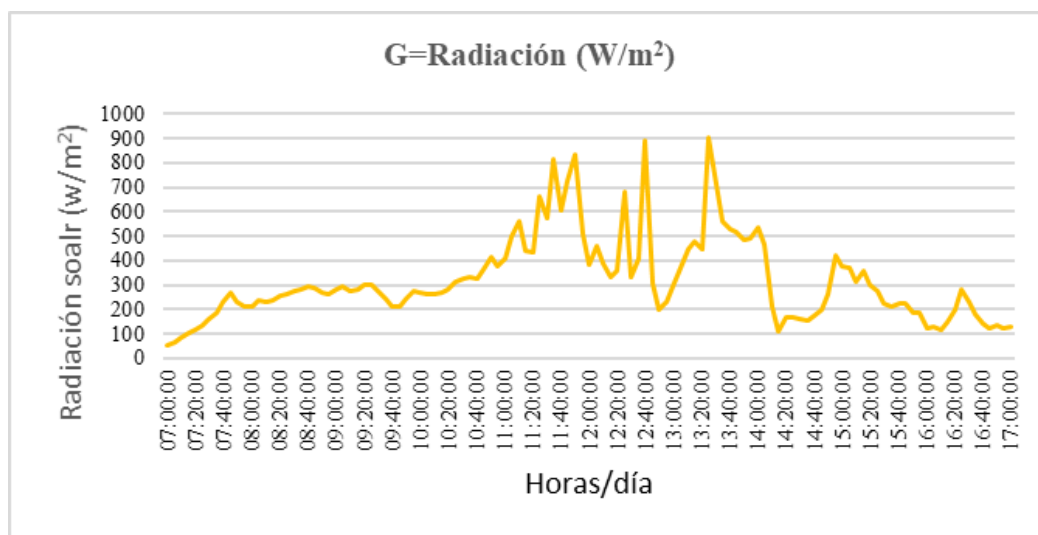


Figura 6. Conversión de la corriente y la radiación solar.



**Figura 7.** Comportamiento de la potencia y la radiación solar.



**Figura 7.** Recurso solar: radiación solar.

Por lo que las horas solar pico (HSP), resultó:

$$HSP = \frac{5}{60} * \frac{38555.64}{1000} = 3.21$$

que corresponde a un promedio de irradiancia de 321 W/m<sup>2</sup> durante el período, esto es consistente bajo las condiciones climáticas.

#### Comportamiento de la generación energética útil AC.

El proceso de transformación o conversión de la energía útil lo lleva a cabo el inversor, que es suministrado de energía DC por la batería entre 12 a 13,5 V, en este proceso el inversor

convierte en energía útil AC, y según los datos registrados, la energía se mantuvo casi constante durante el periodo de estudio, en a figura 9 se muestra el desempeño del inversor, en donde se muestra que el voltaje AC se mantiene en el rango de 210 - 220 V AC respectivamente, la energía necesaria para ser convertida depende de la energía que suministra el panel solar a la batería.

#### Evaluación del rendimiento

Para evaluar el análisis del rendimiento diario se siguió la metodología de la Norma UNE-ENIEC 61724-1.

**Datos:**

Energía total AC,  $E_{CA} = 389,18 \text{ Wh}$   
 Irradiancia Integrada,  $H_i = 3212,94 \text{ Wh/m}^2$   
 Potencia Nominal STC,  $P_{MPP, STC} = 130 \text{ W}$   
 Irradiancia STC,  $G^*_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$

$$PR = \frac{2.994}{3.213} = 0,932$$

**Evaluación del rendimiento final (Y\_F)**

El sistema generó el equivalente a 2,99 h de operación a su potencia nominal (130 W). Este valor es completamente razonable para un día de operación FV.

$$Y_F = \frac{389.18}{130} = 2,99 \text{ h}$$

**Rendimiento de referencia (Y\_R)**

El recurso solar recibido es el equivalente a 3,21 h de Sol Pico (HSP), este valor es físicamente coherente para un día de medición de 7:00 - 17:00 h, que totalizan 10 horas, de los cuales 3,21 h, que corresponde a las HSP.

$$Y_R = \frac{3212.94}{1000} = 3,21 \text{ h}$$

**Factor de rendimiento (PR)**

El Factor de rendimiento es 93,20 %, este valor es robusto, ya que las unidades de entrada son correctas. El PR es muy alto, lo cual indica que el sistema está operando con una eficiencia excelente, muy cerca de la eficiencia máxima del inversor (93,2 %). No hay grandes pérdidas secundarias por sistema de cableado, suciedad, u otros.

**Rendimiento de arreglo (Y\_A)**

El rendimiento DC del panel es de 3,21 h, este valor debe ser mayor que el  $Y_F$  (AC) porque incluye la energía que el inversor pierde en la conversión.

$$Y_A = \frac{2.994}{0.932} = 3,21 \text{ h}$$

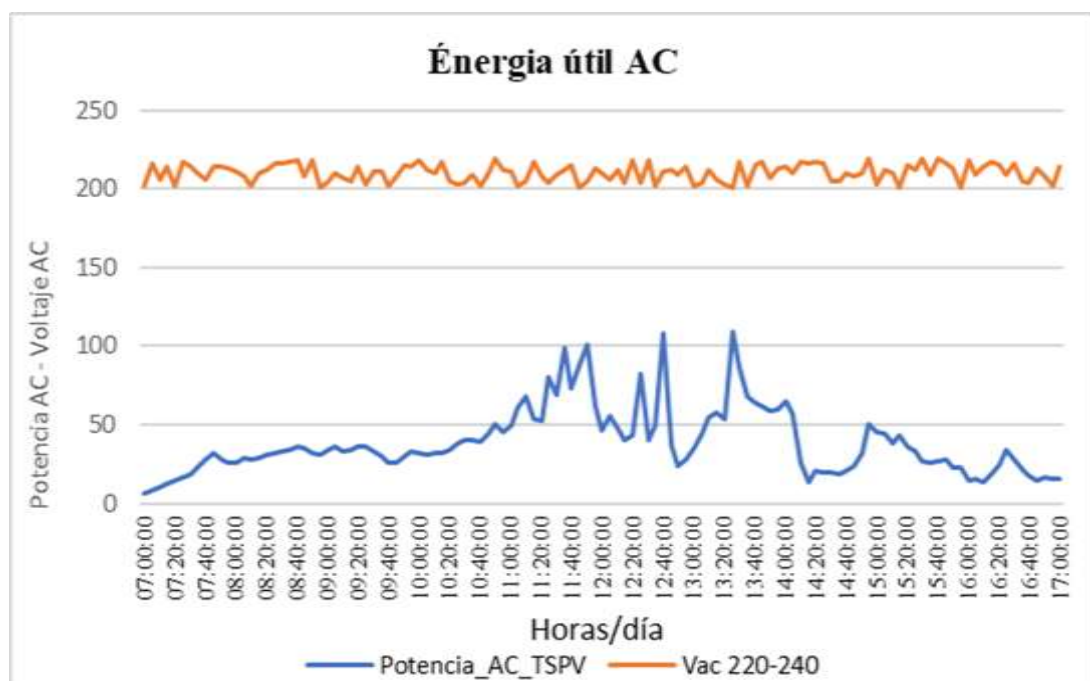
**Pérdidas de captura (L\_C)**

Las pérdidas de captura son de solo 0,001 h, este es un valor extremadamente bajo, equivalente 0,001/3,24 aproximadamente al 1.00 % de la energía disponible. Este nivel bajo de  $L_C$  es excelente y sugiere que la corrección por temperatura que aplicó fue efectiva o el impacto de la temperatura en este día fue mínimo; no hubo sombreado ni suciedad (soiling) significativa, ya que estos factores aumentarían drásticamente  $L_C$ .

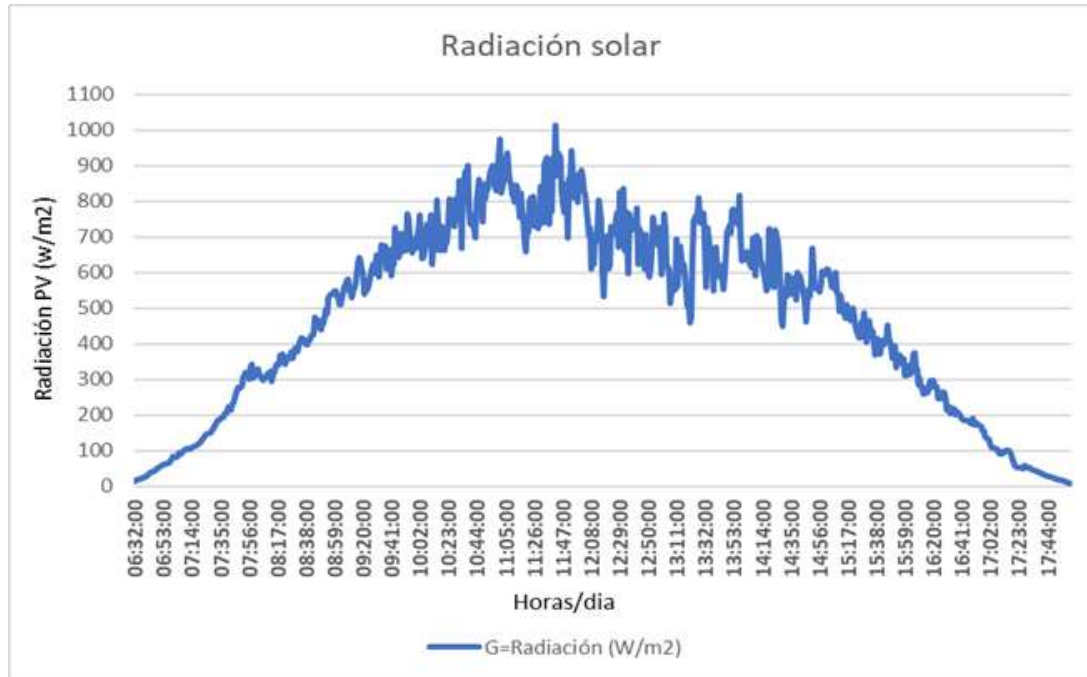
$$L_C = 3,213 - 3,212 = 0,001 \text{ h}$$

**Pérdidas del Sistema ( $L_S$ )** Las pérdidas del sistema son de 0,218 h, al comparar  $L_S$  con  $L_C$  la diferencia es 0,001 h, por lo que las pérdidas del sistema son el componente dominante de la ineficiencia total.

$$L_C = 3,212 - 2,994 = 0,218 \text{ h}$$



**Figura 9.** Generación de la energía útil.



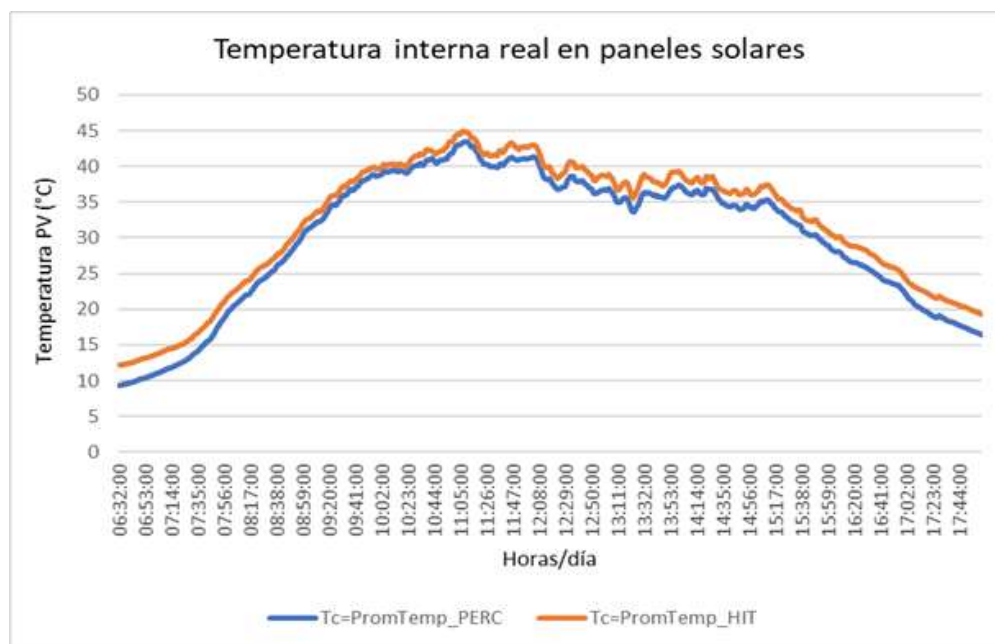
**Figura 8.** Radiación solar – agosto 2025 (EMA Vantage Pro2).

### Parámetros meteorológicos ambientales

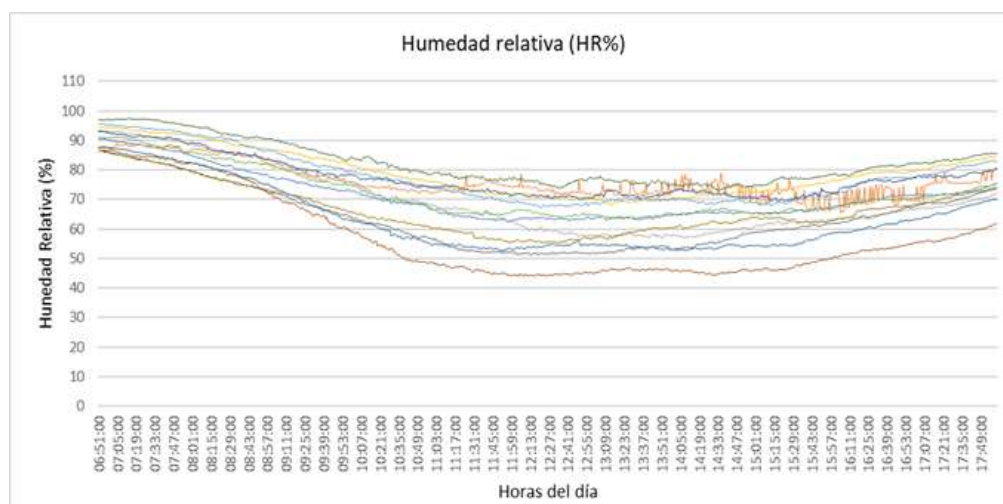
#### Radiación solar

Según el comportamiento de la radiación solar, los picos más altos de registraron entre las 9:00 – 16:00 h, que sobrepasan los 500 W/m<sup>2</sup>, y la curva tiene un comportamiento según la trayectoria del sol. Y, en el intervalo de las horas del día entre las

10:00 a 1:300 h, los picos son los más elevados llegando por encima de los 800 W/m<sup>2</sup>, los cuales indican cielos despejados con buena radiación para la conversión de energía solar a energía eléctrica útil (Figura 10).



**Figura 9.** Comportamiento de la temperatura interna en las celdas solares del panel.



**Figura 10.** Comportamiento de la humedad en el medio ambiente.

### Temperatura interna en el panel solar

En la figura 11 se registró la temperatura interna en el panel solar; cabe indicar que la temperatura es una variable que atenúa la generación de energía llegando en el intervalo de las horas del día por encima de los 25 °C a 45 °C, esto implica una disminución en la eficiencia energética.

### Humedad

En la figura 12, que corresponde al promedio se registró el comportamiento de la humedad relativas, siendo una variable que influye en el panel solar, atenuando la incidencia de la radiación solar, esto ocurre por lo general en horas de la mañana cuando la humedad alcanza el 90 %, la evaporación del contenido de agua en el aire, llegando en ese intervalo de horas entre 70 % hasta 50 % de humedad.

Estas variables ambientales considerárlas son importantes para evaluar el comportamiento energético del panel solar semitransparente y analizar el comportamiento de la eficiencia.

## DISCUSIÓN

Para evaluar el rendimiento de los paneles solares, se utilizan dos métricas principales, eficiencia de conversión de potencia (PCE), es el porcentaje de la energía solar que el panel convierte en electricidad útil, los paneles tradicionales de silicio tienen eficiencias comerciales que oscilan entre el 18 al 24 % (Alonso Lorenzo, 2025).

Los dispositivos semitransparente objeto de estudio logró una notable eficiencia de conversión de potencia (PCE) del 14,66 % con una transmitancia de luz visible promedio del 13,2 % (Chen et al. 2025).

El estado del arte actual (2020-2025) muestra que la eficiencia de los paneles solares semitransparentes, aunque limitada en comparación con sus contrapartes opacas, varía entre el 5 al 15 %. (Park et al.2024).

Este enfoque ha permitido que los prototipos de laboratorio alcancen eficiencias de hasta el 34,85 %, demostrando que es posible maximizar la generación de energía sin comprometer el paso de la luz, aunque en estas aplicaciones la transparencia se optimiza para la porción NIR del espectro en lugar de la visible (Giuliano et al., 2021).

El rendimiento de cualquier panel solar se puede describir mediante su curva de corriente-voltaje (I-V), que ilustra la relación entre la corriente y el voltaje de salida bajo condiciones de irradiación y temperatura específicas. Los parámetros clave de esta curva son la corriente de cortocircuito (ISC), la tensión de circuito abierto (VOC) y el punto de máxima potencia (MPP), donde el producto de la corriente y la tensión es máximo. La generación de energía de un panel solar depende de dos factores ambientales clave: la radiación solar incidente y la temperatura del panel. Un aumento en la irradiación solar provoca un incremento casi lineal de la corriente de salida, mientras que la tensión se mantiene relativamente constante (Alonso, SUNFIELDS - SFE - Solar, 2025).

El factor temperatura, incrementa la energía cinética de los electrones en los materiales semiconductores, lo que reduce la diferencia de potencial eléctrico y, en consecuencia, la tensión de salida y la potencia total generada. Los paneles pueden alcanzar temperaturas hasta 40 °C por encima de la temperatura ambiente, llegando a rangos de 65 °C a 85 °C en días calurosos (Green et al., 2025).

Para cuantificar este efecto, se utiliza el coeficiente de temperatura, que indica la pérdida de potencia por cada grado Celsius que la temperatura del panel excede los 25 °C. Los paneles solares comerciales tienen un coeficiente de temperatura típico de entre - 0,3 a - 0,5 % por grado Celsius. Las tecnologías más avanzadas, como las células de tipo N (TOPCon o HJT), presentan coeficientes más bajos, lo que les confiere un mejor rendimiento en climas cálidos (Alonso, SUNFIELDS - SFE - Solar, 2025).

Las temperaturas superiores a 30 °C reducen en un 10 % la eficiencia de los paneles solares, pues hay una caída de voltaje. En cambio, durante el verano, los días son largos y hay más horas de sol (López Redondo, 2022). Y, en cuanto a las precipitaciones, la lluvia y la nieve pueden afectar el rendimiento, pero de manera diferente, las lluvias ayudan a limpiar la superficie de los paneles de polvo y suciedad, lo que contribuye a mantener una eficiencia óptima, estudios han demostrado que la suciedad puede provocar una pérdida de eficiencia de hasta el 25 % en tan solo seis semanas en zonas desérticas (FactorEnergía, 2023).

La eficiencia de un panel no es igual a la de sus células individuales, siendo generalmente entre 1 a 3 % inferior debido a factores como la reflexión del vidrio, la sombra del marco y la temperatura, y la curva I-V es directamente dependiente de la radiación solar y la temperatura, un aumento en la irradiación incrementa la corriente de salida, mientras que un aumento en la temperatura del panel reduce la tensión de salida (Flores Rivera & Domínguez Ramírez, 2020).

## CONCLUSIÓN

El alto factor de rendimiento de 92,22 % confirma que las pérdidas ajenas a la conversión son insignificantes, la principal limitación de rendimiento es la pérdida de conversión DC/AC inherente al inversor, el diseño de la infraestructura y la instalación logran maximizar la captación del recurso solar disponible. Las horas solar pico alcanzaron 3,24 h en el periodo de medición, esto se debe a las frecuentes precipitaciones en la zona de estudio, así como las condiciones de la época lluviosa en Chachapoyas. La energía útil obtenida desde el inverso fue constante entre 210 - 220 V AC, lo que constituye un dispositivo adecuado para usos en aparatos electrónicos de baja potencia menores a 500 W. Las pérdidas se generaron básicamente por el proceso de conversión de corriente continua en alterna de fue del 6,86 %, en tanto que las pérdidas por cableado y efecto de suciedad fueron mínimas alrededor del 1,05 %. El panel solar semitransparente analizado, constituido una referencia para iniciar nuevas investigaciones bajo las condiciones de climáticas de Chachapoyas.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

FIEC: Conceptualización, Software, Análisis formal, Investigación, Recursos, Curación de datos, Escritura del borrador original; HSG: Metodología, Curación de datos, Escritura.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que la presente investigación se realizó de manera independiente y no existen relaciones financieras, profesionales ni personales que puedan haber influido en el desarrollo o los resultados del estudio. Asimismo, declaran no haber recibido financiamiento externo de organismos públicos o privados para la ejecución de este trabajo. El trabajo fue autofinanciado y realizado de manera independiente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso Lorenzo, J. A. (02 de mayo de 2025). *SUN-FIELDS*. Obtenido de Eficiencia y Rendimiento de placas solares: Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/eficiencia-rendimiento/>
- Bergren, M. R., Wu, Y., Zeller, M., Lunt, R. R., & Alzahrani, A. (2021). Comparison of transparent solar panels and conventional photovoltaics in real outdoor conditions. *Advanced Energy Materials*, 11(1), 2003828. <https://doi.org/10.1002/aenm.202003828>.
- Chandrasekaran, S., Sripriya, R., & Swaminathan, S. (2022). Performance assessment of solar PV panels under real weather conditions for sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112158>
- Chen, C., Uddin, Z., Lu, Y., Sheng, C., Zhang, N., & Xie, H. (2025). Breaking the Efficiency-Transparency Compromise in Semitransparent Solar Cells by Optimizing the Perovskite/C60 Interface. *Energy, Environmental, and Catalysis Applications*, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.5c14006>.
- Espinoza, R., Sánchez, V., & Arias, L. (2021). Evaluación del potencial solar fotovoltaico en regiones andino-amazónicas del Perú. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101139. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101139>.

- Espinoza-Ramírez (2023). Efecto de la temperatura en la eficiencia de fotovoltaicos. *Boletín científico de Ciencias Básica e Ingeniería del ICBI. Publicación Semestral Páidi Vol. 11 No. Especial 5* (2023) 184-190.  
<https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11841>.
- FactorEnergía. (01 de 03 de 2023). *FactorEnergía*. Obtenido de ¿Afectan la suciedad y el polvo en el rendimiento de las placas solares? Disponible en: <https://www.factorenergia.com/es/blog/aut-consumo-electrico/afectan-la-suciedad-y-el-polvo-en-el-rendimiento-de-las-placas-solares/>
- Flores Rivera, N., & Domínguez Ramírez, M. (2020). *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio*. Disponible en : <https://ci-mav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/791/1/Norma%20R-sario%20flores%20Rivera%2C%20Mi-guel%20C%81ngel%20Dom%20C%ADn-guez%20Ram%20C%ADrez%20Maestr%20C%ADa%20en%20Energ%20C%ADas%20Renova-bles.pdf>: Centro de investigación en materiales avanzados S. C. Posgrado.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2022). Solar cell efficiency tables (version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(1), 3–12. <https://doi.org/10.1002/pip.3506>
- Gholami, M., Habib Reza, M., Dorahaki, S., & Muyeen, S. M. (2025). Investigating solar harvesting in various greenhouse designs with semi-transparent PV panels on roofs and sidewalls. *Energy and Buildings*, Volume 348, 1 December 2025, 116436.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116436>.
- Giuliano, G., Bonasera, A., Arrabito, G., & Pignataro, B. (2021). Semitransparent Perovskite Solar Cells for Building Integration and Tandem Photovoltaics: Design Strategies and Challenges. *RR Solar*, Sol. RRL 2021, 5, 2100702 - DOI: 10.1002/solr.202100702.
- Guo, Y., & Hu, K. (2026). Does the clean energy transition enhance economic sustainability? A study on energy use efficiency in developing countries. *Finance Research Letters*, Volume 89, February 2026, 109315.  
<https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.109315>.
- Kashfia Rahman et al., (2024). Comparative analysis of solar modulo configuration and tracking systema for enhanced energy generation in South Sakucia Union, Bhola, Bangladesh: A software based analysis. *Heliyon* 10 (2024) e33884.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33884>.
- Liao, M., Zhang, J., Zhao, Y., & Zhou, L. (2020). Evaluation of transparent photovoltaic systems under tropical climatic conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 210, 110559.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110559>.
- Liu, Q., Jiang, Y., Jin, K., Qin, F., & Li, X. (2020). High-efficiency semitransparent organic solar cells with enhanced thermal stability. *Advanced Energy Materials*, 10(6), 1904196.  
<https://doi.org/10.1002/aenm.201904196>.
- López Redondo, N. (01 de setiembre de 2022). *Energy News*. Obtenido de Lluvia, nieve, granizo, Cómo afectan los fenómenos meteorológicos a los paneles solares. Disponible en: <https://www.energynews.es/lluvia-nieve-granizo-como-afectan-los-fenomenos-meteorologicos-a-los-paneles-solares/>
- Mondal, S., Gururajan, B., Narasihman, V., & Maity, S. (2025). High performance Cs based semi-transparent perovskite solar cells with superior colour neutrality index and power conversion efficiency. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 204, September 2025, 112757.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpics.2025.112757>.
- Montes-Romero, J., Cruz-Escabias, A., Almonacid, F., & Fernández, E. F. (2026). Comparative analysis of semi-transparent photovoltaic technologies for agrivoltaic applications. *Energía renovable*, Volumen 256, Parte H ,1 de enero de 2026, 124573. <https://doi.org/10.1016/j.re-nene.2025.124573>.
- Nespoli, A., Niccolai, A., Ogliari, E., Perego, G., Collino, E., & Ronzio, D. (2022). Machine Learning techniques for solar irradiation nowcasting: Cloud type classification forecast through satellite data and imagery. *Applied Energy*, Volume 305, 1 January 2022, 117834.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117834>.
- Park, J., Lee, K., Lee, J., & Kwanyong, S. (2024). All-back-contact neutral-colored transparent crystalline silicon solar cells enabling seamless modularization. *Engineering - PNAS*, <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2404684121>.
- Rincón, C. A., Jiménez, D., & Ramírez, M. (2023). Evaluación del comportamiento de paneles solares

- semitransparentes en entornos tropicales urbanos. *Journal of Cleaner Production*, 404, 137190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137190>.
- Sagar Gupta, V., Gupta, P., Tripathi, R., & Kumar Sharma, A. (2022). Effect of various materials used for semitransparent solar panel fitted at roof top of a building. *Materialstoday: Proceedings*, Volume 57, Part 5, 2022, Pages 2067-2072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.268>.
- Tibebu Gebreabe, S., Bogale, D., Hailu, A., & Worku, A. (2025). Advances in solar energy technologies: A comprehensive review of photovoltaic, thermal, and hybrid systems for sustainable energy solutions. *Next Research*, Volume 3, January 2026, 101176. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101176>.
- UNE (2023). Norma técnica de la Asociación Española de Normalización. Génova, 6b- 28004. Madrid
- para evaluación del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos UNE-EN-IEC61724-1, abril, 2022. [info@une.org](mailto:info@une.org). [www.une.org](http://www.une.org).
- Yoon, H. C., Yoo, H. S., Park, S. H., & Kim, H. (2017). Semitransparent perovskite solar cells with efficient bifacial photovoltaic response. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(33), 17320–17328. <https://doi.org/10.1039/C7TA03152A>.
- Zang, Y., Xu, W., Yong, Y., & Hou, J. (2025). Large-area printing technologies for organic photovoltaic cells. *Energy*, Volume 54, December 2025, 102150. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2025.102150>.
- Zhao, D., Wang, Y., Song, Z., & Yan, Y. (2022). Enhancing the performance of transparent photovoltaic devices under diffuse light conditions. *Nano Energy*, 96, 107076. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107076>.