

**EVALUACIÓN DE CUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE LA INSTITUCIÓN  
UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO MEDIANTE MODELAMIENTO,  
SIMULACIONES Y MEDICIONES EXPERIMENTALES**

**HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI**

**DAVID OSORIO SALAZAR**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

**EVALUACIÓN DE CUATRO SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE LA INSTITUCIÓN  
UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO MEDIANTE MODELAMIENTO,  
SIMULACIONES Y MEDICIONES EXPERIMENTALES**

**HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI**

**DAVID OSORIO SALAZAR**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista**

**Asesores**

**Bayron Alvarez Arboleda**

**Doctor en estudios organizacionales.**

**Jorge Julián Cañas Sánchez**

**Especialista en alta gerencia**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERIA ELÉCTRICA**

**MEDELLÍN**

**2025**

## Contenido

Introducción .....	10
1. Planteamiento del problema.....	11
1.1. Descripción.....	11
1.2. Formulación .....	12
2. Justificación .....	13
3. Objetivos.....	15
3.1. Objetivo general .....	15
3.2. Objetivos específicos.....	15
4. Marco teórico .....	16
4.1. Que es un sistema fotovoltaico.....	16
4.1.1. Componentes de un sistema fotovoltaico .....	17
4.1.1.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	18
4.1.1.2. Sistema on-grid .....	19
4.1.1.3. Sistema off-grid.....	20
4.1.1.4. Sistema hibrido.....	21
5. Metodología .....	22
5.1. Tipo de Proyecto: .....	22
5.2. Método .....	22
5.3. Población y muestra .....	22
5.4. Instrumentos de recolección de información .....	22
5.4.1. Fuentes primarias .....	22
5.4.2. Fuentes secundarias .....	23
6. Resultados .....	24

7. Conclusiones .....	50
8. Recomendaciones .....	51
9. Referencias bibliográficas.....	53

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema simplificado de un sistema fotovoltaico .....	17
<b>Figura 2.</b> Estructura de un sistema on-grid .....	19
<b>Figura 3.</b> Estructura de un sistema off-grid .....	20
<b>Figura 4.</b> Estructura de un sistema hibrido .....	21
<b>Figura 5.</b> Etapa uno y tres del sistema solar fotovoltaico .....	24
<b>Figura 6.</b> Etapa dos del sistema solar fotovoltaico .....	25
<b>Figura 7.</b> Datasheet panel solar 550w .....	26
<b>Figura 8.</b> Datasheet panel solar 415w .....	27
<b>Figura 9.</b> Inversor CPS SCA30~36KLT*T/SA .....	28
<b>Figura 10.</b> Producción energía con Hsp mínimo .....	33
<b>Figura 11.</b> Producción energía con Hsp máximo.....	34
<b>Figura 12.</b> Producción de energía con Hsp constante utilizado para el cálculo de la Institución Universitaria Pascual Bravo.....	35
<b>Figura 13.</b> Estructura del sistema On-grid implementado en la Institución Universitaria Pascual Bravo.....	36
<b>Figura 14.</b> Medidor bidireccional utilizado en el sistema fotovoltaico de la Institución Universitaria Pascual Bravo.....	38
<b>Figura 15.</b> Datasheet medidor bidireccional utilizado en el sistema fotovoltaico de la Institución Universitaria Pascual Bravo.....	39
<b>Figura 16.</b> Programa de medición en tiempo real de producción de energía del sistema fotovoltaico .....	40
<b>Figura 17.</b> Panel de monitoreo de generación de energía solar .....	42
<b>Figura 18.</b> Generación de energía mensual con HSP min .....	43
<b>Figura 19.</b> Generación de energía mensual con HSP máx.....	44

### Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Características de los equipos que componen el sistema solar instalado.....	26
<b>Tabla 2.</b> Configuración MPPT del inversor .....	29
<b>Tabla 3.</b> Variación Hsp respecto a cada mes del año.....	32
<b>Tabla 4.</b> Generación de energía mensual con variación de Hsp .....	42

## **Resumen**

### **EVALUACIÓN DE 4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI**

**DAVID OSORIO SALAZAR**

Este trabajo de grado tiene como objetivo evaluar cuál de los cuatro sistemas fotovoltaicos instalados en la Institución Universitaria Pascual Bravo es el más eficiente en términos de generación energética y costos operativos. Para ello, se adoptó un enfoque metodológico mixto que incluyó una revisión documental y la recolección de datos técnicos mediante observación directa, entrevistas y análisis de registros internos. Se aplicaron cálculos energéticos, simulaciones basadas en la irradiación solar histórica y comparaciones de diseño y rendimiento. Los resultados mostraron que el sistema on-grid de mayor capacidad instalado en los bloques 24, 25 y 26, con una potencia total de 137.74 kWp, presenta la mayor eficiencia relativa, generando en promedio 19.412 kWh/mes y contribuyendo a una reducción estimada de 117.4 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Además, se evidenció que el uso de paneles de mayor potencia reduce costos de instalación y mejora la relación costo-beneficio. Se concluye que la adecuada selección de tecnologías y la optimización del diseño fotovoltaico son claves para maximizar el ahorro energético y reforzar el compromiso institucional con la sostenibilidad ambiental.

*Palabras claves:* eficiencia, energía solar, sistema fotovoltaico, costos operativos, sostenibilidad.

## **Abstract**

This undergraduate thesis aims to evaluate the efficiency of four photovoltaic systems installed at the Pascual Bravo University Institution, focusing on energy generation and operational costs. A mixed-method approach was employed, combining literature review with empirical data collection through direct observation, technical interviews, and analysis of internal records. Energy production was calculated using standardized formulas, and simulations were conducted based on historical solar irradiation data to compare system performance under varying conditions. The results indicate that the largest on-grid system, located in blocks 24, 25, and 26 with an installed capacity of 137.74 kWp, achieved the highest relative efficiency—producing an average of 19,412 kWh per month and contributing to an annual reduction of approximately 117.4 tons of CO<sub>2</sub>. Additionally, the use of higher-power solar panels proved to be more cost-effective by reducing installation complexity and infrastructure requirements. The study concludes that careful technology selection and system design optimization are critical to maximizing energy savings and enhancing the institution's commitment to environmental sustainability.

**Keywords:** efficiency, solar energy, photovoltaic system, operational costs, sustainability.

## Glosario

**Corriente (I).** Flujo de carga eléctrica que circula por un conductor; en los sistemas fotovoltaicos indica la cantidad de electricidad generada o consumida.

**Eficiencia energética.** Relación entre la energía útil generada por el sistema fotovoltaico y la energía solar recibida; clave para evaluar el rendimiento del sistema.

**Energía solar fotovoltaica.** Tipo de energía renovable obtenida al convertir la radiación solar en electricidad mediante celdas solares.

**Horas Solar Pico (HSP).** Valor promedio diario de irradiación solar útil para calcular la producción de energía fotovoltaica en una ubicación específica.

**Inversor.** Dispositivo que convierte la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC) apta para uso en red o consumo interno.

**Maximum Power Point Tracking (MPPT).** Tecnología utilizada por los inversores para optimizar la captación de energía ajustando constantemente el punto de máxima potencia del sistema.

**On-grid.** Tipo de sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica pública, permite inyectar excedentes de energía generada.

**Panel solar.** Módulo compuesto por celdas fotovoltaicas que capta la radiación solar y la transforma en electricidad.

**Potencia pico (kWp).** Máxima capacidad de generación de un sistema fotovoltaico bajo condiciones estándar de prueba.

**Sostenibilidad.** En el contexto del proyecto, se refiere al uso responsable de recursos energéticos renovables para reducir el impacto ambiental institucional.

**Voltaje (V).** Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos; en sistemas fotovoltaicos determina la capacidad de impulsar la corriente a través del sistema.

## **Introducción**

La Institución Universitaria Pascual Bravo ha integrado sistemas fotovoltaicos como parte de su compromiso con la sostenibilidad y la reducción de su huella de carbono, promoviendo el uso de energías renovables y generando ahorros energéticos a largo plazo. Sin embargo, para maximizar los beneficios de estos sistemas, es esencial determinar cuál de los cuatro sistemas instalados es el más eficiente en términos de generación energética y costos operativos.

Este anteproyecto propone un análisis detallado de cada sistema fotovoltaico en función de su rendimiento energético, costos de mantenimiento y operación, estabilidad de generación y contribución a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Identificar el sistema más eficiente permitirá optimizar los recursos energéticos de la institución y sentar las bases para decisiones informadas sobre futuras inversiones en infraestructura sostenible, reafirmando su compromiso con la innovación y la responsabilidad ambiental.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1. Descripción**

La implementación de sistemas fotovoltaicos en la Institución Universitaria Pascual Bravo representa un paso importante hacia el uso de fuentes de energía renovables, lo cual permite reducir la dependencia de la electricidad proveniente de fuentes convencionales y disminuir los costos energéticos a largo plazo. Actualmente, la institución cuenta con cuatro sistemas fotovoltaicos, cada uno con diferentes características de instalación, operación y capacidad de generación. Sin embargo, la variabilidad en la eficiencia y los costos operativos de estos sistemas plantea la necesidad de una evaluación detallada que permita identificar cuál de ellos es el más adecuado para satisfacer las demandas energéticas de la universidad de manera óptima.

Este anteproyecto de esta investigación es analizar y comparar la eficiencia de los cuatro sistemas fotovoltaicos en términos de generación de energía y costos operativos, teniendo en cuenta factores como la capacidad de generación eléctrica, el mantenimiento requerido y los costos asociados. A través de una evaluación exhaustiva, se busca proporcionar a la institución una base de datos que respalde la toma de decisiones informadas sobre la inversión y gestión de sus recursos energéticos.

La relevancia de este estudio radica en que permitirá identificar el sistema más eficiente y rentable, contribuyendo a optimizar el uso de la energía renovable dentro de la universidad. Además, los resultados obtenidos podrán ser útiles para futuras iniciativas de sostenibilidad en instituciones educativas, sirviendo como referencia para otras universidades interesadas en implementar o mejorar sistemas de generación fotovoltaica.

## **1.2. Formulación**

Uno de los objetivos de este trabajo es dar respuesta a la pregunta ¿Cuál de los cuatro sistemas fotovoltaicos instalados en la Institución Universitaria Pascual Bravo es el más eficiente en términos de generación de energía y costos operativos?, para así contribuir en el desarrollo de energías renovables que beneficien a la institución.

## 2. Justificación

La implementación de sistemas fotovoltaicos en instituciones educativas no solo promueve el uso de energías limpias y renovables, sino que también fortalece el compromiso de estas instituciones con la sostenibilidad ambiental y la reducción de la huella de carbono (López y García, 2021). La Institución Universitaria Pascual Bravo ha apostado por esta iniciativa al instalar cuatro sistemas fotovoltaicos, los cuales, aunque diversos en diseño y características, están orientados a reducir el consumo de energía convencional y, consecuentemente, los costos operativos de la institución. Sin embargo, es esencial determinar la eficiencia de cada sistema para asegurar una inversión adecuada de los recursos y maximizar el rendimiento energético y económico.

Este estudio es particularmente relevante, ya que permitirá identificar el sistema fotovoltaico con mayor eficiencia en términos de generación de energía y de costos operativos. La identificación de estos factores contribuirá a la optimización de los recursos destinados a la sostenibilidad de la universidad, posibilitando un modelo de referencia para otras instituciones educativas que buscan implementar sistemas de energía renovable de manera efectiva (Martínez y Suárez, 2022). Además, los resultados de esta investigación pueden servir como un punto de partida para futuras mejoras en la infraestructura energética de la universidad, promoviendo un enfoque más eficiente y sustentable (González, 2023).

En el contexto actual, la transición hacia el uso de energías renovables es urgente para enfrentar los desafíos del cambio climático y la sobreexplotación de los recursos fósiles. Las universidades, en su rol de formadoras de nuevas generaciones y centros de innovación, tienen una responsabilidad significativa en promover y liderar prácticas sostenibles (Ruiz, 2020). La implementación efectiva de sistemas fotovoltaicos no solo reduce el impacto ambiental, sino que también puede inspirar a estudiantes y docentes a involucrarse en iniciativas de sostenibilidad, ampliando el impacto positivo de estas acciones en la comunidad universitaria y en la sociedad en general (Álvarez y Torres, 2023).

Realizar un estudio detallado de estos sistemas resulta fundamental para identificar las mejores prácticas en la gestión de la energía solar en un contexto universitario. Este análisis permite:

Optimizar los recursos energéticos de la institución: Con una evaluación comparativa de los cuatro sistemas fotovoltaicos instalados, se podrá establecer cuál de ellos ofrece una mejor eficiencia en la conversión de energía solar, generando así mayor rentabilidad.

Apoyar la toma de decisiones informadas: Al analizar los costos, beneficios y retorno de inversión de cada sistema, la universidad podrá justificar futuras inversiones en infraestructura sostenible basándose en datos precisos y específicos de su contexto operativo.

Contribuir al compromiso con la sostenibilidad ambiental: Identificando el sistema fotovoltaico más eficiente y estable no solo ayuda a reducir los costos energéticos de la institución, sino que también refuerza su responsabilidad ambiental, al tiempo que sirve como ejemplo de sostenibilidad en la educación superior.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar cuál de los 4 sistemas fotovoltaicos que tiene la Institución Universitaria Pascual Bravo es el más eficiente.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Estudiar los sistemas fotovoltaicos de la Institución Universitaria Pascual Bravo.
- Tomar las medidas de los 4 sistemas, comparando su eficiencia, rentabilidad, costos y beneficios.
- Identificar el sistema más eficiente y rentable para la Institución Universitaria Pascual Bravo.

## 4. Marco teórico

Para evaluar los sistemas fotovoltaicos en la Institución Universitaria Pascual Bravo en términos de eficiencia energética y costos operativos, es crucial contar con una base teórica sólida que permita comprender los conceptos de eficiencia en sistemas fotovoltaicos, la economía de la energía renovable, las metodologías de análisis de costos y el impacto del mantenimiento en la eficiencia de estos sistemas

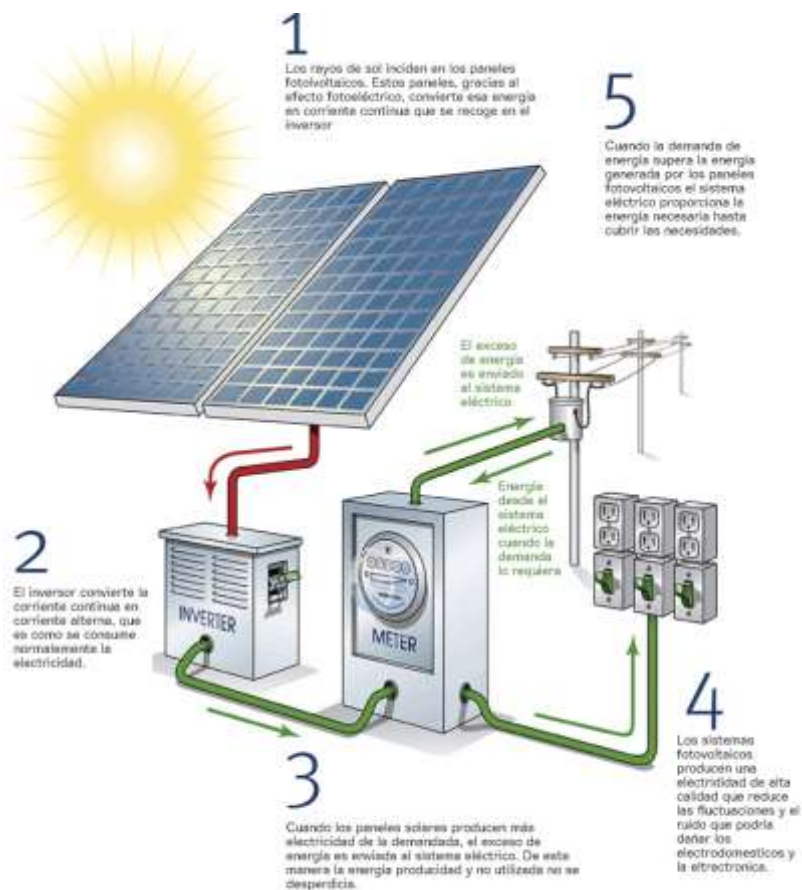
Según (Shukla, Sudhakar, & Baredar, 2016), La eficiencia en un sistema fotovoltaico es un indicador de la capacidad del sistema para transformar la energía solar en electricidad utilizable y depende de factores como la calidad de los paneles, la orientación, las condiciones climáticas y el mantenimiento. En el contexto de instituciones educativas, es fundamental analizar la eficiencia en condiciones reales de operación para optimizar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos instalados. Shukla et al. (2016) enfatizan que la eficiencia teórica de los paneles es afectada por factores como la temperatura y la incidencia de la radiación solar, aspectos que deben considerarse en un análisis comparativo. Además, Kalogirou (2009) destaca que la optimización de la eficiencia depende también de la reducción de las pérdidas energéticas causadas por factores ambientales y técnicos. Estos estudios sirven de base para establecer un marco de análisis de la eficiencia en términos específicos para cada sistema.

### 4.1. Que es un sistema fotovoltaico

Según (González, 2020), un sistema fotovoltaico es un sistema eléctrico que genera energía a partir de la luz del sol, mediante la tecnología fotovoltaica. La energía solar fotovoltaica se obtiene gracias al efecto fotoeléctrico, que consiste en la capacidad de ciertos materiales de absorber fotones (partículas lumínicas) y liberar electrones, lo que genera una corriente eléctrica.

**Figura 1.**

*Esquema simplificado de un sistema fotovoltaico.*



*Nota.* Tomado de [https://www.heliosfera.com/wp-content/uploads/2019/02/autconsumo\\_diagrama-889x1024.png](https://www.heliosfera.com/wp-content/uploads/2019/02/autconsumo_diagrama-889x1024.png)

#### 4.1.1. Componentes de un sistema fotovoltaico

**Paneles Solares (Celdas Fotovoltaicas):** Son dispositivos semiconductores que convierten la luz solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Están compuestos por varias células solares unidas que generan corriente continua (DC).

**Inversor:** Convierte la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna (AC), que es el tipo de electricidad que se utiliza en la mayoría de los hogares y redes eléctricas.

**Controlador de Carga:** Regula el voltaje y la corriente que fluyen desde los paneles solares a las baterías, evitando sobrecargas y optimizando la eficiencia.

**Baterías:** Almacenan la energía generada para su uso posterior, especialmente en sistemas autónomos o en situaciones donde el suministro de energía de la red no está disponible.

**Estructuras de Soporte:** Los paneles solares están montados sobre estructuras que optimizan su orientación e inclinación para maximizar la captación de radiación solar.

**Cableado y Conectores:** Conectan todos los componentes del sistema y transportan la electricidad desde los paneles hasta el inversor y la batería.

**Medidor de Energía:** En sistemas conectados a la red, mide la cantidad de energía que se exporta a la red o se importa de ella.

#### **4.1.1.1. Tipos de sistemas fotovoltaicos**

Existen tres tipos de sistemas, clasificados por la manera como se conectan a la red. La energía fotovoltaica, aprovechada por estos sistemas, puede ser la misma. Lo que los diferencia es la forma de conexión.

**Sistemas conectados a red:** También conocidos como “sistemas on grid”. Como su nombre indica, estos sistemas están conectados a la red pública de corriente alterna.

**Sistemas aislados:** También son conocidos como “sistemas off grid”. Son sistemas que no se conectan a la red pública y que pueden generar por sí solos la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

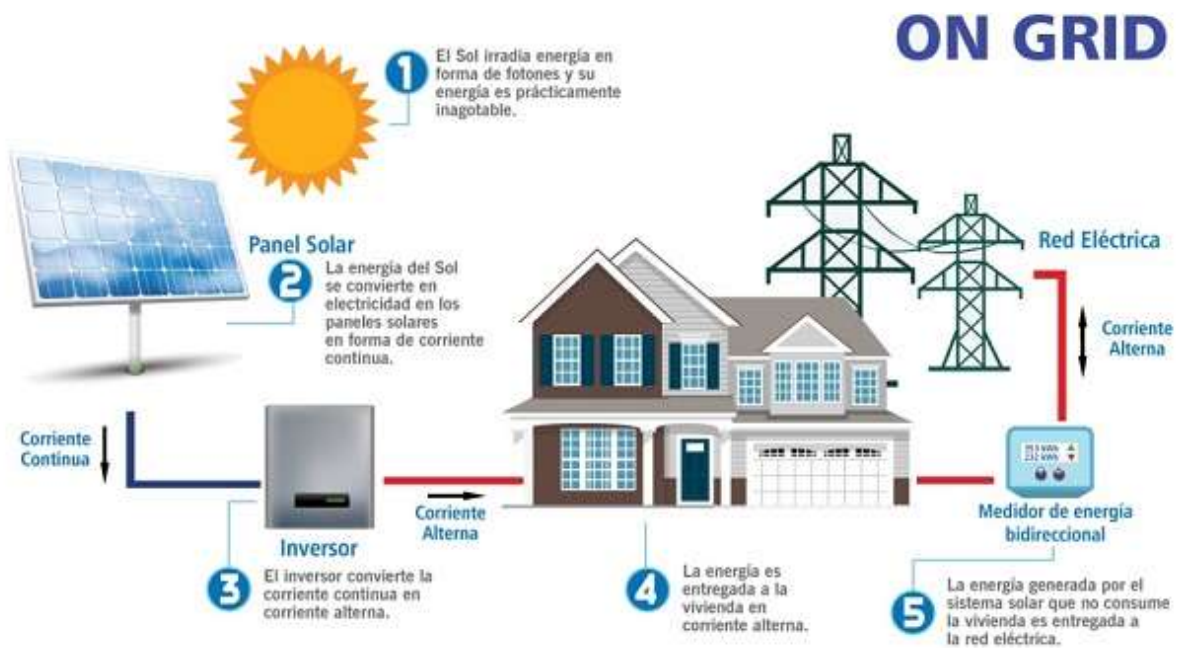
**Sistemas híbridos:** Son aquellos que combinan varias fuentes de energía, que pueden ser desde generadores a diésel hasta configuraciones eólicas o geotérmicas, e incluso la misma red pública.

### 4.1.1.2. Sistema on-grid

La característica principal de este sistema es su capacidad para conectarse a la red pública de energía eléctrica, pudiendo incluso entregar energía a dicha red, si así se requiere. Opera de manera que la energía solar recibida por los paneles solares fotovoltaicos es convertida en energía eléctrica continua (CC). Esta energía pasa por el convertidor, que se encarga de transformar esta corriente continua (CC) en corriente alterna (CA). Esta conversión a corriente alterna debe hacerse a la misma frecuencia de la red pública para poder conectarse a ella. El convertidor garantiza la calidad del voltaje generado para que sea recibida por la red pública. Estos sistemas, por lo general, no tienen baterías, así que su configuración es la más barata. Son los más utilizados en zonas urbanas, donde hay acceso a la red de energía eléctrica.

**Figura 2.**

*Estructura de un sistema on-grid.*



Nota. Tomado de <https://casassolares.org/wp-content/uploads/2021/11/ON-GRID-Solar-1.jpg>

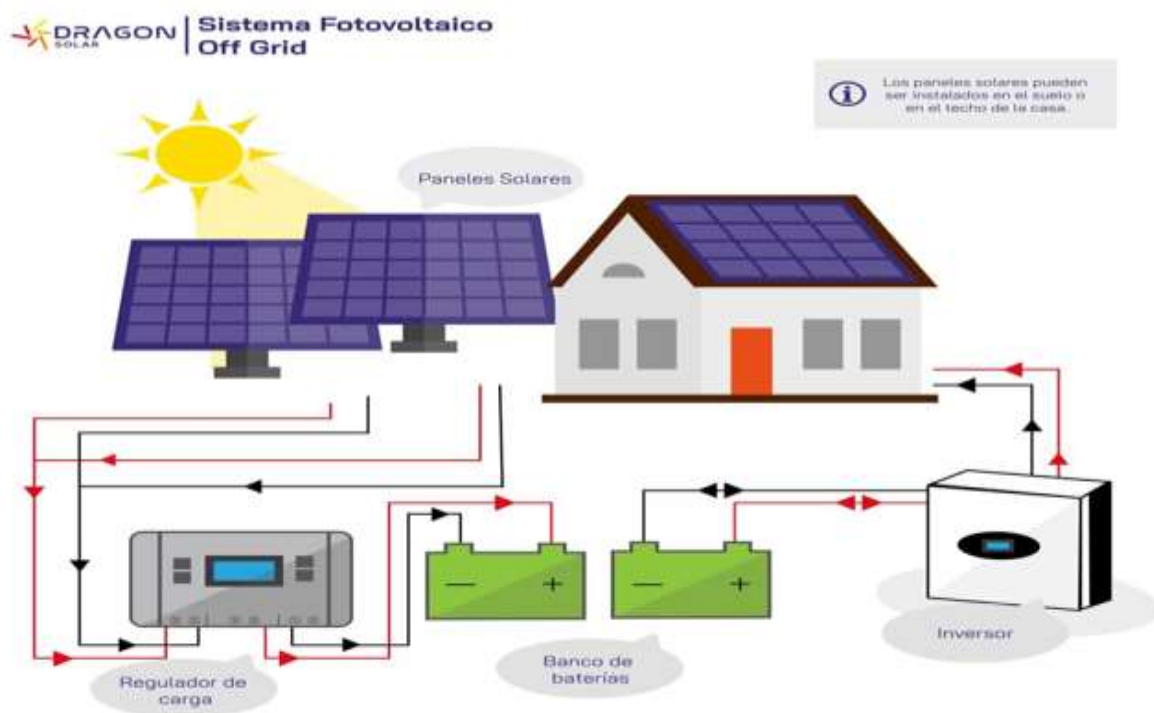
### 4.1.1.3. Sistema off-grid.

Los sistemas off grid son autónomos y no están conectados a red alguna u otra fuente de energía. Estos sistemas funcionan de la misma manera que los on grid, con paneles fotovoltaicos recibiendo energía solar, convirtiéndola en corriente continua y pasándola a un conversor que la transforma en energía alterna, adicionalmente tienen un banco de baterías en la que le permite almacenar energía para su consumo posterior, ubicado antes del inversor.

Esta configuración es mucho más costosa que la on grid, sobre todo por el costo de las baterías. Se aprovecha principalmente en áreas remotas donde el acceso a la red de energía eléctrica es escaso o inexistente.

#### Figura 3.

*Estructura de un sistema off-grid.*



*Nota.* Tomado de <https://i0.wp.com/solar.dragoncontractors.com/wp-content/uploads/2022/09/off-grid-02-1-scaled.jpg?fit=1024%2C1024&ssl=1>

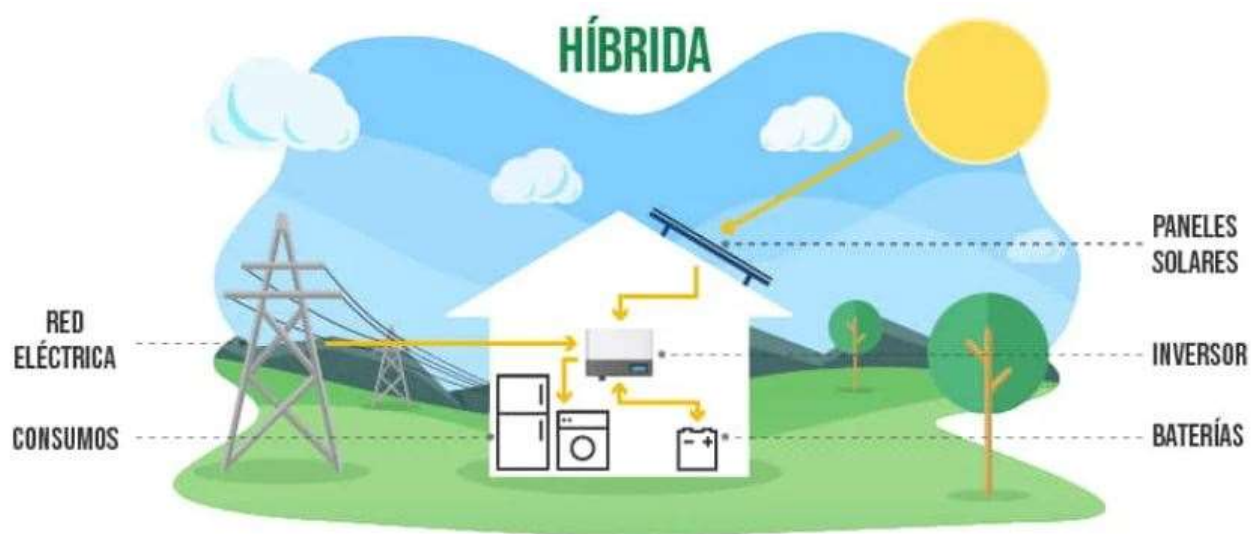
#### 4.1.1.4.Sistema híbrido.

El sistema híbrido se integra eficientemente con otras fuentes de energía, que puede ser la misma red eléctrica, un generador diésel, un sistema geotérmico, etcétera. Su principal diferencia con el sistema on grid es que el inversor del sistema también cumple funciones de cargador para las baterías, aprovechando la energía excedente de los otros sistemas para carga.

Esto se da porque es capaz de convertir de CC a CA, como el inversor del sistema on grid, así como de CA a CC para poder realizar las cargas de las baterías. Estos sistemas también son capaces de ofrecer energía a la red eléctrica pública, si están conectados.

#### Figura 4.

*Estructura de un sistema híbrido.*



*Nota.* Tomado de <https://autosolar.pe/energia-solar/que-es-un-sistema-fotovoltaico-hibrido>

## **5. Metodología**

### **5.1. Tipo de Proyecto:**

El presente trabajo consta de dos partes, una de revisión de literatura y otra práctico-teórica. La revisión permite obtener información de diferentes investigaciones para aportar datos relevantes sobre la evaluación y desempeño de los sistemas fotovoltaicos y la práctico teórica, toma de datos y medición de variables cuantitativas utilizando un modelo de evaluación comparativa que determinar cuál de los sistemas instalados es más eficiente en términos de producción de energía y costos operativos para la Institución Universitaria Pascual Bravo.

### **5.2. Método**

Para la ejecución de revisión de literatura, se consultarán diversas bases de datos relacionadas con la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y mediciones reales que permitan hacer una comparación entre los parámetros que debe tener un sistema fotovoltaico para que sea lo más eficiente posible, en términos de producción de energía y costos operativos.

### **5.3. Población y muestra**

Este proyecto está dirigido en beneficio a todos los integrantes de la institución Universitaria Pascual Bravo.

### **5.4. Instrumentos de recolección de información**

#### **5.4.1. Fuentes primarias**

- Observación directa: análisis del físico de los sistemas fotovoltaicos, condiciones de instalación, orientación y sombra.

- Entrevistas o encuestas: dirigidas a los técnicos, encargados de mantenimiento y personal administrativo para conocer el estado de los sistemas, costos y problemas técnicos, etc.

#### **5.4.2. Fuentes secundarias**

- Documentación técnica de los sistemas fotovoltaicos: Manuales de los fabricantes, especificaciones técnicas de los equipos, diagramas de instalación y fichas técnicas.
- Informes o registros internos: Consumos energéticos mensuales, costos operativos, mantenimiento realizado y proyecciones energéticas.
- Bases de datos: Artículos académicos, estudio de caso, libros y estándares internacionales y locales sobre energía fotovoltaica y eficiencia energética.
- Políticas y normativas: Leyes o reglamentos nacionales sobre energía renovable y eficiencia energética.

## 6. Resultados

La Institución Universitaria Pascual Bravo actualmente cuenta con un sistema fotovoltaico On-grid con una potencia pico instalada de 179.7 kWp, compuesto por tres etapas, donde la etapa uno y tres se encuentran ubicadas en los bloques 24,25 y 26 con una capacidad de 137.74 kWp como se muestra en la siguiente figura:

### **Figura 5.**

*Etapa uno y tres del sistema solar fotovoltaico.*



*Nota.* Tomado de <https://pascualbravo.edu.co/>

Por otro lado, la etapa dos, está ubicada en el bloque seis con una capacidad de 42 kWp; cubriendo un área total de 1.000 m<sup>2</sup>, en la cual se han instalado un total de 387 paneles, 225 de 400 Wp y 162 paneles de 545 Wp el cual se muestra en la siguiente figura:

**Figura 6.**

*Etapa dos del sistema solar fotovoltaico.*



Nota. Tomado de <https://pascualbravo.edu.co/>

Este sistema genera al mes en promedio 19.412 kWh/mes, lo que a su vez contribuye a la reducción de emisiones contaminantes de aproximadamente 117.4 TCO<sub>2</sub> según el factor de reducción de emisiones emitido por la UPME que permite calcular el impacto ambiental de un sistema solar.

En la siguiente tabla se recopila la información sobre los parámetros de cada uno de los equipos que componen el sistema fotovoltaico actual.

**Tabla 1.**

Características de los equipos que componen el sistema solar instalado.

Equipo	Cantidad	Modelo
Panel Tiger Pro 72HC 530-550W	162	JKM550M-72HL4/JKM550M-72HL4-V
Panel Solar Tiger Pro 54HC 395-415W	225	JINKO SOLAR Tiger Pro JKM405M-54HL4
Inversor de Cadena Chint Power	1	CPS SCA30~36KTL-T/SA (208/220/240)

Nota. Fuente diseño propio.

Características adicionales de los elementos que componen el sistema fotovoltaico.

**Figura 7.**

Datasheet panel solar 550w.

SPECIFICATIONS										
Module Type:	JKM530M-72HL4 JKM530M-72HL4-V		JKM535M-72HL4 JKM535M-72HL4-V		JKM540M-72HL4 JKM540M-72HL4-V		JKM545M-72HL4 JKM545M-72HL4-V		JKM550M-72HL4 JKM550M-72HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp	550Wp	409Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.36V	37.84V	40.63V	37.91V	40.70V	38.08V	40.80V	38.25V	40.90V	38.42V
Maximum Power Current (Imp)	13.07A	10.42A	13.17A	10.50A	13.27A	10.55A	13.36A	10.60A	13.45A	10.65A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.26V	46.50V	49.34V	46.57V	49.42V	46.65V	49.52V	46.74V	49.62V	46.84V
Short-circuit Current (Isc)	13.71A	11.07A	13.79A	11.14A	13.85A	11.19A	13.94A	11.26A	14.03A	11.33A
Module Efficiency STC (%)	20.55%		20.75%		20.94%		21.13%		21.33%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

*STC:  Irradiance 1000W/m <sup>2</sup>	 Cell Temperature 25°C	 AM=1.5
NOCT:  Irradiance 800W/m <sup>2</sup>	 Ambient Temperature 20°C	 AM=1.5  Wind Speed 1m/s

Nota. Tomado de [https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN.pdf)

Figura 8.

Datasheet Panel solar 415w.

SPECIFICATIONS										
Module Type	JKM395M-54HL4 JKM395M-54HL4-V		JKM400M-54HL4 JKM400M-54HL4-V		JKM405M-54HL4 JKM405M-54HL4-V		JKM410M-54HL4 JKM410M-54HL4-V		JKM415M-54HL4 JKM415M-54HL4-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	395Wp	294Wp	400Wp	298Wp	405Wp	301Wp	410Wp	305Wp	415Wp	309Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	30.32V	28.26V	30.42V	28.42V	30.52V	28.56V	30.62V	28.72V	30.79V	28.88V
Maximum Power Current (Imp)	13.03A	10.40A	13.15A	10.47A	13.27A	10.55A	13.39A	10.62A	13.48A	10.69A
Open-circuit Voltage (Voc)	36.90V	34.83V	36.98V	34.90V	37.06V	34.98V	37.14V	35.05V	37.31V	35.21V
Short-circuit Current (Isc)	13.71A	11.07A	13.78A	11.13A	13.85A	11.19A	13.92A	11.24A	14.01A	11.32A
Module Efficiency STC (%)	20.23%		20.48%		20.74%		21.00%		21.25%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature [NOCT]	45±2°C									

\*STC:  Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>

 Cell Temperature 25°C

 AM=1.5

NOCT:  Irradiance 800W/m<sup>2</sup>

 Ambient Temperature 20°C

 AM=1.5

 Wind Speed 1m/s

Nota. Tomado de [https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM395-415M-54HL4-\(V\)-30-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM395-415M-54HL4-(V)-30-F1-EN.pdf)

Figura 9.

Inversor CPS SCA30~36KTL-T/SA.

Model Name	CPS SCA30KTL-DO	CPS SCA36KTL-DO-480
<b>DC Input</b>		
Nominal DC Input Power	31kW	37kW
Max. DC Input Power for each MPPT	16kW	19kW
Max. DC Input Voltage	1000Vdc	1000Vdc
Operating DC Input Voltage Range		300-900Vdc
Start-up DC Input Voltage / Power		330V/300W
Nominal DC Input Voltage	630Vdc	710Vdc
Number of MPP Trackers		2
MPPT Voltage Range	480-800Vdc	540-800Vdc
Max. Input Current	2 x 32A	2 x 34A
Number of DC Inputs		4 strings x 2
DC Disconnection Type		Integrated DC switch
<b>AC Output</b>		
Rated AC Output Power	30kW	36kW
Max. AC Output Power	30kW	36kW
Rated Output Voltage	230/400Vac	277/480Vac
Output Voltage Range*	320-460Vac	422-528Vac
Grid Connection Type	3Φ/PE	3Φ/PE
Max AC Output Current	43.3A	43.3A
Rated Output Frequency		50Hz/60Hz
Output Frequency Range*		47-53Hz/57-63Hz
Power Factor		>0.99 (±0.8 adjustable)
Current THD		<3%
AC Inrush Current		149A Peak/211us
Maximum Output Fault Current	L-N/PE:100A Peak@320ms;56.6A RMS@20ms; L1/L2/L3 158A Peak@992ms; 70.4A RMS@20ms	
<b>System</b>		
Topology		Transformerless
Max. Efficiency	98.4%	98.6%
Euro Efficiency	98.0%	98.1%
Stand-by / Night Consumption		<20W/<2W
Protective Class		I
Overvoltage Category		PV(II), Mains(III)
<b>Environment</b>		
Protection Degree		IP65
Cooling		Variable speed cooling fans
Operating Temperature Range		- 25°C to +60°C (derating from +45°C)
Operating Humidity		0-100%, non-condensing
Operating Altitude		4000m (derating from 2000m)
<b>Display and Communication</b>		
Display		LCD+LED
Communication	Standard: RS485, USB, Multifunction Relay Option: Ethernet, Zigbee	
<b>Mechanical Data</b>		
Dimensions (WxHxD) (mm)	600x1000x230	
Weight (kg)	50 (Inverter)+5 (Wiring Box)	
<b>Safety</b>		
Safety and EMC Standard	LVD: 2006/95/EC EMC: 2004/108/EC, IEC/EN 62109-1: 2010, IEC/EN 62109-2: 2011; IEC/EN61000-6-2: 2005, IEC/EN61000-6-3: 2007	
Grid Standard	BDEW; VDE AR-N-4105/VDE 0126-1-1/A1; G83/1/1; G59/2; C10/11; NB/T32004; GB/T19964; NRS097;IEC61683;IEC60068;IEC62116;IEC61727	
* The "Output Voltage Range" and "Output Frequency Range" may differ according to specific grid codes.		

Nota. Tomado de <https://equielectric.com/producto/cps-inversor-solar-industrial-cpsca3036ktl-t-sa-208-220-240/>.

El sistema solar fotovoltaico implementado en la universidad se configura a partir de un conjunto de componentes dimensionados en base a las especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes de los inversores y los módulos fotovoltaicos. Los datos de diseño y las tablas de características de estos elementos fundamentales constituyen la base para la configuración eléctrica y operativa del sistema la cual se compone como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 2.**

*Configuración MPPT del inversor.*

<b>Configuración cadenas del inversor</b>	
# MPPTs máx	4/3+3+2+2
# Conjuntos de conexión de circuito cerrado	4/3+3+3+3

*Nota.* Fuente diseño propio.

El sistema fotovoltaico analizado presenta una configuración estratégica que involucra 18 cadenas, cada una compuesta por 18 paneles conectados en serie, lo que resulta en un voltaje operativo nominal de 720 VDC y una corriente de 13A por seguidor MPPT. La interconexión en paralelo de estas cadenas se justifica por la necesidad de amplificar la corriente total suministrada al inversor, mientras se mantiene el voltaje dentro de los márgenes operativos especificados en su placa técnica. Esta arquitectura, cuidadosamente implementada, busca optimizar la captación energética del campo fotovoltaico sin exceder las capacidades del inversor, el cual cumple una función esencial en la conversión DC-AC y la sincronización con la red eléctrica. En consecuencia, el dimensionamiento de las protecciones del sistema se fundamentó rigurosamente en las especificaciones técnicas de cada componente, con el objetivo primordial de asegurar un funcionamiento eficiente y seguro.

Para realizar el cálculo del sistema de energía solar en la Institución Universitaria Pascual Bravo, se establece a partir del siguiente modelo de operación, se hizo con base a la siguiente ecuación:

$$\#P = E / Wp * Hsp * Pr * \#días$$

donde:

Wp: Potencia promedio del panel

HSP: Irradiación Solar Promedio u Hora Solar Pico, para Medellín 4.2 de acuerdo a los datos promedio del IDEAM.

Pr: Factor de rendimiento del sistema (0.8)

#P: Número total de paneles

#días: Número de días del mes.

Con base a la ecuación matemática anterior procederemos a calcular la energía producida de acuerdo a cada uno de los paneles utilizados en el sistema fotovoltaico:

**Paneles 550w, cantidad :162**

$E = \#P * Wp * Hsp * Pr * \#días$ , entonces:

$$E = 162 * 550w * 4.2 * (0.8) * 30 \rightarrow E = 8981280wh/m \text{ ó } 8981.28 kwh/m$$

**Paneles 415w, cantidad :225**

$$E = 225 * 415w * 4.2 * (0.8) * 30 \rightarrow E = 9639000wh/m \text{ ó } 9639 kwh/m$$

Con base a lo anterior podemos determinar que matemáticamente el sistema debería producir 18.620kW/m, valor inferior al suministrado por la empresa que instaló los sistemas dentro del plantel educativo de 19.412 kwh/mes.

### **Niveles de irradiación solar en la Institución Universitaria Pascual Bravo**

La Institución Universitaria Pascual Bravo revela una disponibilidad de Horas Solar Pico (HSP) con un promedio anual que oscila entre 3.87 y 4.7 horas diarias. Esta estimación, fundamentada en los mapas de radiación solar proporcionados por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, evidencia una variabilidad estacional inherente, aunque los datos sugieren una relativa estabilidad en los valores extremos a lo largo del ciclo anual.

Los datos de operación del sistema fotovoltaico instalado en la institución reportan una media de 3.6 HSP diarias. Sin embargo, el análisis detallado de la irradiación solar específica para la ubicación geográfica de la institución universitaria Pascual Bravo, basado en estudios de irradiación regional, arroja un valor promedio de 4.2 HSP diarias. Esta discrepancia sugiere que el sistema instalado presenta una eficiencia superior a la proyectada inicialmente en condiciones de irradiación real. En términos prácticos, esto implica que la captación de energía solar incidente por unidad de área y por día excede las estimaciones preliminares, lo que se traduce directamente en un incremento en la generación de energía eléctrica por parte del arreglo fotovoltaico.

Para la simulación de la producción energética mensual del sistema fotovoltaico de la Institución Universitaria Pascual Bravo, se adoptó un enfoque metodológico que considera la irradiación solar promedio (HSP) proporcionada por los datos históricos del IDEAM para cada mes del año. Dada la heterogeneidad en la potencia de los paneles instalados (162 unidades de 545 W y 225 unidades de 415W), se determinó una potencia promedio ponderada por el número de paneles. El cálculo arrojó una potencia total instalada de 89.100W para los paneles de 545W y 93.375W para los de 415W. Al promediar la potencia total (182.475W) entre el número total de paneles (387), se obtuvo una potencia promedio por panel de 471.5 Wp. Con este valor de potencia promedio, se procedió a calcular la energía generada mensualmente mediante la ecuación:

$$E = \#P * Wp * Hsp * Pr * \#días.$$

La siguiente tabla detalla la variación en la producción de energía mes a mes, influenciada directamente por las fluctuaciones del valor de HSP entre sus valores mínimo y máximo registrados por el IDEAM (Ver anexo 1).

**Tabla 3.**

*Variación HSP respecto a cada mes del año.*

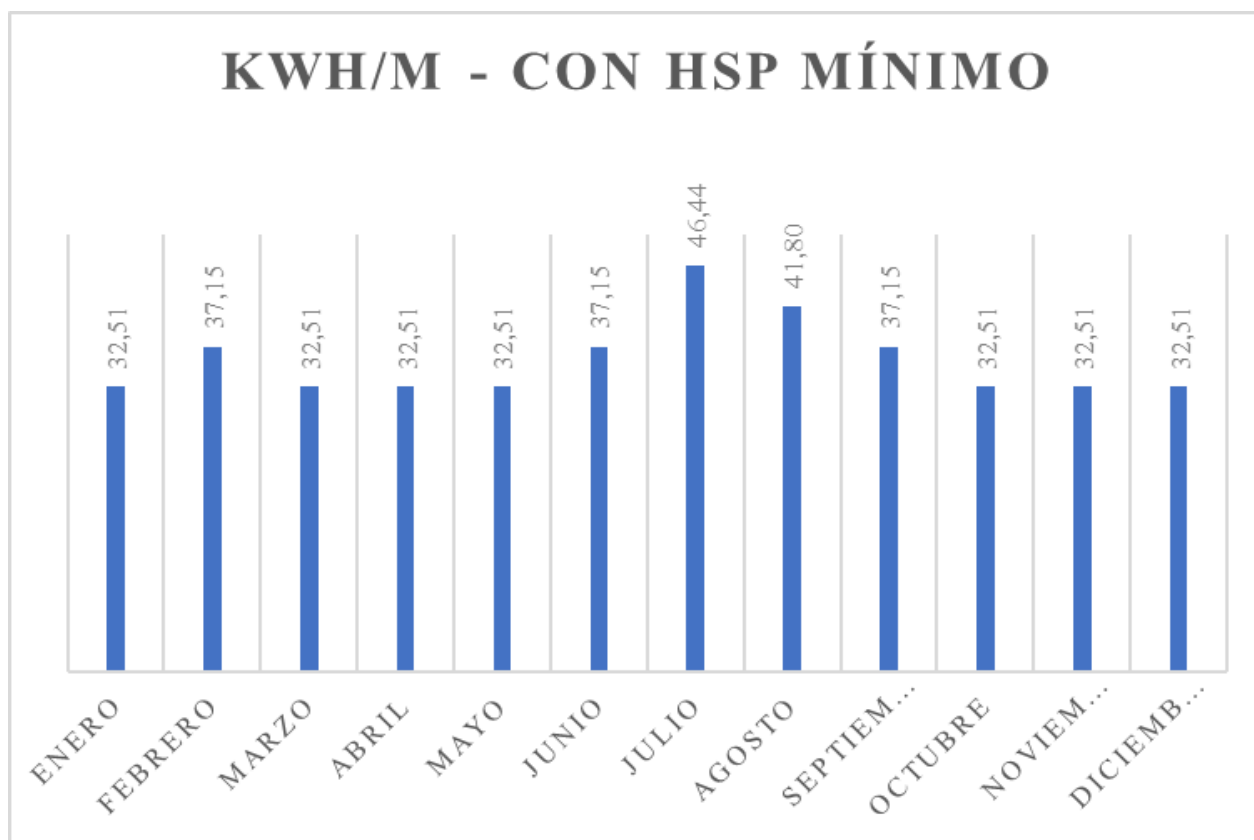
Mes	Hsp min	Hsp máx.	# Paneles	kwh/m - min	kwh/m - máx
Enero	3,5	4	387	32,51	37,15
Febrero	4	4,5	387	37,15	41,80
Marzo	3,5	4	387	32,51	37,15
Abril	3,5	4	387	32,51	37,15
Mayo	3,5	4	387	32,51	37,15
Junio	4	4,5	387	37,15	41,80
Julio	5	5,5	387	46,44	51,08
Agosto	4,5	5	387	41,80	46,44
Septiembre	4	4,5	387	37,15	41,80
Octubre	3,5	4	387	32,51	37,15
Noviembre	3,5	4	387	32,51	37,15
Diciembre	3,5	4	387	32,51	37,15

*Nota.* Fuente diseño propio.

A continuación, se procede a simular el comportamiento de la producción de energía la cual se fundamenta en la variación del valor de la Irradiación Solar Promedio (HSP) dentro de los rangos mínimo y máximos históricos registrados por el IDEAM para la ubicación del sistema, tal como se detalla gráficamente en la **Figura 10** y la **Figura 11**. La presentación visual de estos escenarios extremos de HSP permite comprender el espectro de producción energética potencial del sistema fotovoltaico a lo largo del ciclo anual, proporcionando una base sólida para la evaluación de su eficiencia y la planificación operativa.

**Figura 10.**

*Producción energía con HSP mínimo.*



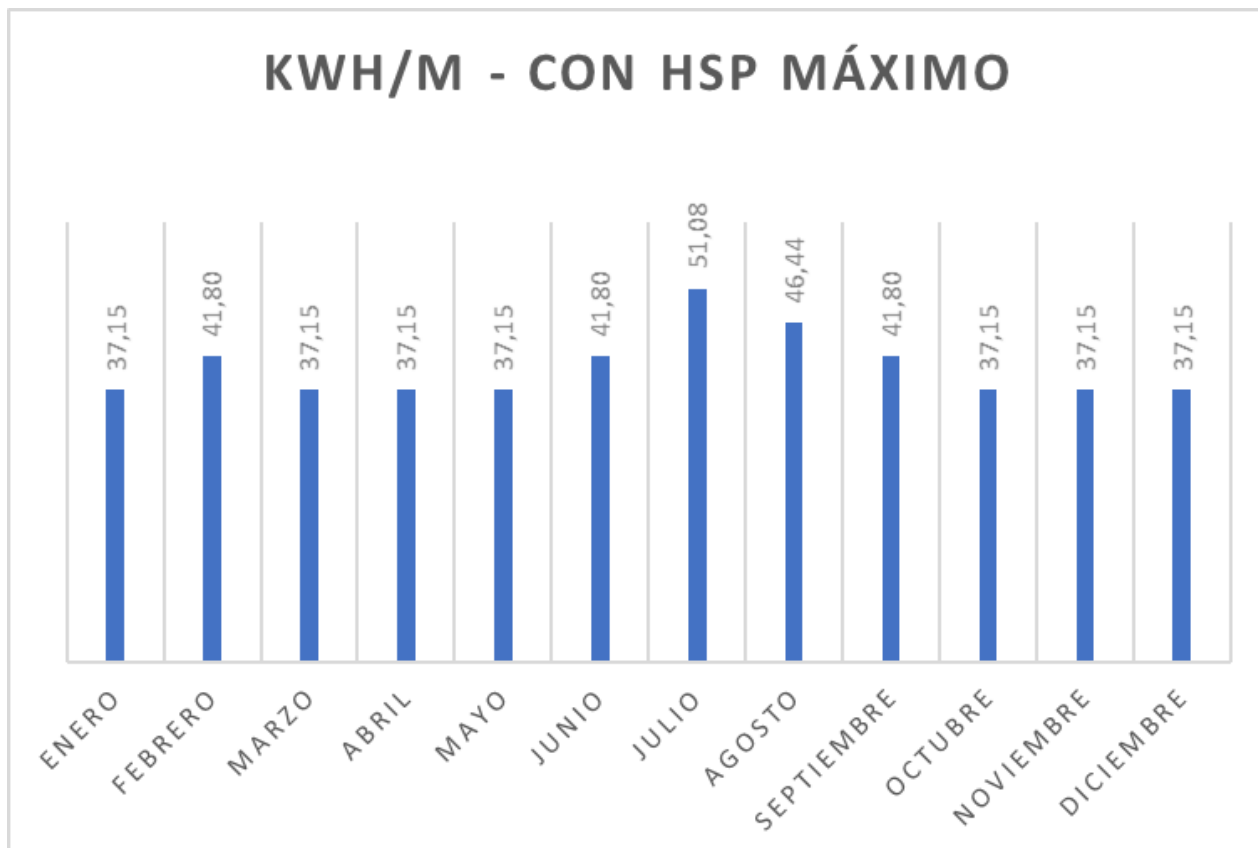
*Nota.* Fuente diseño propio.

Bajo condiciones mínimas históricas de Irradiación Solar Promedio (HSP), la producción mensual de energía del sistema fotovoltaico varía, con un pico en julio y agosto, pero manteniendo una base constante el resto del año. Esta producción mínima es crucial para

dimensionar el sistema, analizar su rentabilidad en el peor escenario y planificar la operación energética.

**Figura 11.**

*Producción energía con HSP máximo.*

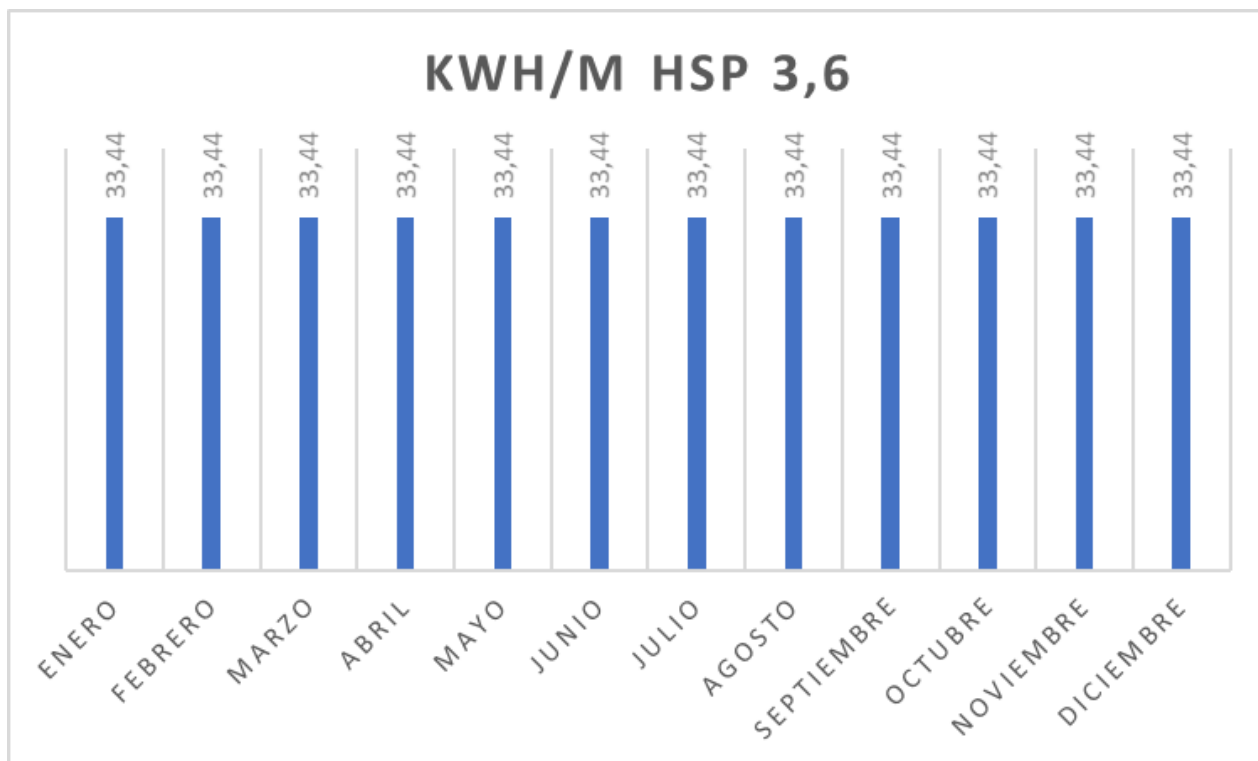


*Nota.* Fuente diseño propio.

En esta grafica vemos que bajo condiciones máximas históricas de Irradiación Solar Promedio (HSP), la producción mensual de energía del sistema fotovoltaico muestra una mayor variabilidad con un pico notable en julio, seguido por agosto y septiembre. La producción general es significativamente más alta que en el escenario de HSP mínimo, lo que subraya el potencial máximo de generación del sistema y es crucial para evaluar su rendimiento óptimo y el retorno de la inversión.

**Figura 12.**

*Producción de energía con HSP constante utilizado para el cálculo de la Institución Universitaria Pascual Bravo.*



*Nota.* Fuente diseño propio.

Analizando la gráfica anterior que representa la producción energética mensual del sistema fotovoltaico de la Institución Universitaria Pascual Bravo utilizando un valor constante del HSP de 3,6 kWh/m<sup>2</sup>/día, se observa una producción uniforme de 33,44 kWh/m cada mes. Este comportamiento lineal y constante, si bien es útil para cálculos teóricos simplificados, contrasta significativamente con la realidad operativa de un sistema fotovoltaico. La irradiación solar, factor primordial en la generación fotovoltaica, experimenta fluctuaciones inherentes a lo largo del año debido a la variación de la inclinación solar, la duración de las horas de luz y las condiciones atmosféricas locales. Por lo tanto, la producción real del sistema Institución Universitaria Pascual Bravo presentará una dinámica mensual variable, influenciada por los valores reales de HSP específicos para cada mes, tal como se evidenció en los análisis previos con los datos históricos

mínimo y máximo del IDEAM. Esta gráfica ilustra un escenario idealizado que no refleja la variabilidad natural de la energía solar disponible.

El sistema de medición implementado en la Institución Universitaria Pascual Bravo para la gestión de su sistema fotovoltaico se basa en un medidor bidireccional trifásico de medida indirecta. Esta configuración es esencial para contabilizar con precisión los flujos de energía entre la instalación solar, la red de distribución del operador Empresas Públicas de Medellín (EPM), y las cargas internas de la institución.

### Figura 13.

*Estructura del sistema On-grid implementado en la Institución Universitaria Pascual Bravo.*



Nota. Tomado de <https://pascualbravo.edu.co/>

La bidireccionalidad del medidor es crucial, ya que permite registrar dos tipos de energía:

- 1. Energía Inyectada a la Red:** Corresponde a la energía generada por el sistema fotovoltaico que excede el consumo instantáneo de la Institución Universitaria Pascual Bravo y, por lo tanto, se entrega a la red de EPM. La medida indirecta, mediante

transformadores de corriente (TCs) y transformadores de potencial (TPs) (aunque no explícitamente mencionados, son implícitos en sistemas trifásicos de esta naturaleza), asegura una medición segura y precisa de estas corrientes y voltajes de alta magnitud.

2. **Energía Consumida de la Red:** Representa la energía que la Institución Universitaria Pascual Bravo toma de la red de EPM cuando la generación fotovoltaica es insuficiente para cubrir su demanda, especialmente durante la noche o en días de baja irradiación solar.

El medidor registra continuamente estos flujos de energía, ver **Figura 14**, permitiendo generar una facturación mensual basada en el balance neto. Si la energía consumida de la red supera la energía inyectada, la Institución Universitaria Pascual Bravo recibirá una factura por el consumo neto. Por el contrario, si la energía inyectada excede el consumo, se pueden generar excedentes de energía.

Es importante destacar que la compensación económica por estos excedentes es un aspecto relevante. Actualmente, EPM remunera la energía excedentaria inyectada a la red a una tarifa de \$200 pesos por kilovatio-hora (kWh). Esta política de compensación incentiva la autogeneración y puede contribuir a la rentabilidad del sistema fotovoltaico a largo plazo para la Institución Universitaria Pascual Bravo.

**Figura 14.**

*Medidor bidireccional utilizado en el sistema fotovoltaico de la Institución Universitaria Pascual Bravo.*



Nota. Tomado de <https://www.ineldec.com.co/MCO-976342572-contador-medidor-trifasico-elster-a1800-semidirecta-indirect- JM>

En sistemas fotovoltaicos de alta corriente (>100 A), se usa un medidor bidireccional indirecto con TCs y TPs para medir con seguridad tanto el consumo como la generación de energía, asegurando una facturación correcta y evitando pérdidas

Figura 15.

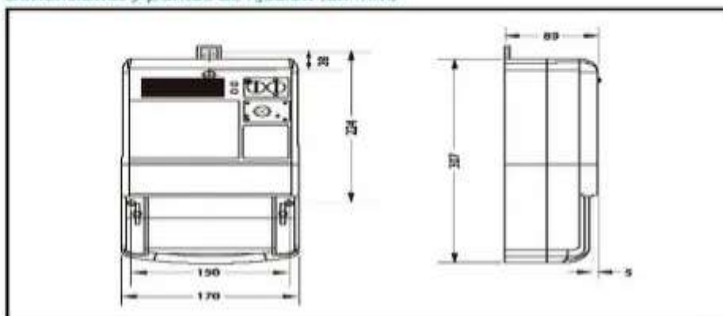
Datasheet medidor bidireccional utilizado en el sistema fotovoltaico de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

## A1800 Medidor electrónico trifásico multitarifa

### Datos Técnicos

Precisión	Energía Activa 0.3 % (IEC 62053-22) 0.5 % (IEC 62053-22) 1.0 % (IEC 62053-21)	Energía Reactiva 2.0 % (IEC 62053-23) La precisión actual es mejor al 0.5 %
Corriente máxima	Continúa a 10 A Temporal (0.5 segundos) al 2000 % de la corriente máxima del medidor	
Corriente nominal	1 (10) A	5 (120) A
Corriente de arranque	Conexión Indirecta (por CT's) 1mA	Conexión Directa <40 mA (I <sub>p</sub> =5 A)
Tensión máxima	Continuo hasta 528 VAC	
Rango de tensión	Rango Nominal 58 V a 415 V	Rango de Operación 46 V a 528 V
Frecuencia	Nominal: 50 Hz ó 60 Hz ± 5 %	
Rango de temperatura	-40 °C a +85 °C en el interior de la cubierta del medidor -40 °C a +60 °C en el exterior	
Rango de humedad	0 % a 100 % no condensado	
Consumo de la fuente de poder	Menor a 3 W	
Voltaje transiente	Prueba Desarrollada Oscilatorio (IEC 61000-4-12) Transiente rápido (IEC 61000-4-4) Prueba de Voltaje de Impulso (IEC 60060-1) Prueba de Aislación AC	Resultados 2.5 kV, 60 seg 4 kV 12 kV @ 1.2/50 µs, >=150 Ω (8 kV con las tarjetas opcionales) 4kV, 50 Hz por 1 minuto
Precisión del reloj interno	Mejor que 0.5 segundos/día (mientras esté energizado)	
Comunicaciones	Puerto Óptico Protocolos del Puerto Óptico Puertos Seriales Protocolos del Puerto Serial	1200 bps a 28,800 bps ANSI C12.18 y C12.19  1200 bps a 19,200 bps ANSI C12.21 y C12.19  Los componentes físicos cumplen las normas IEC 62056-21 ó ANSI C12.18

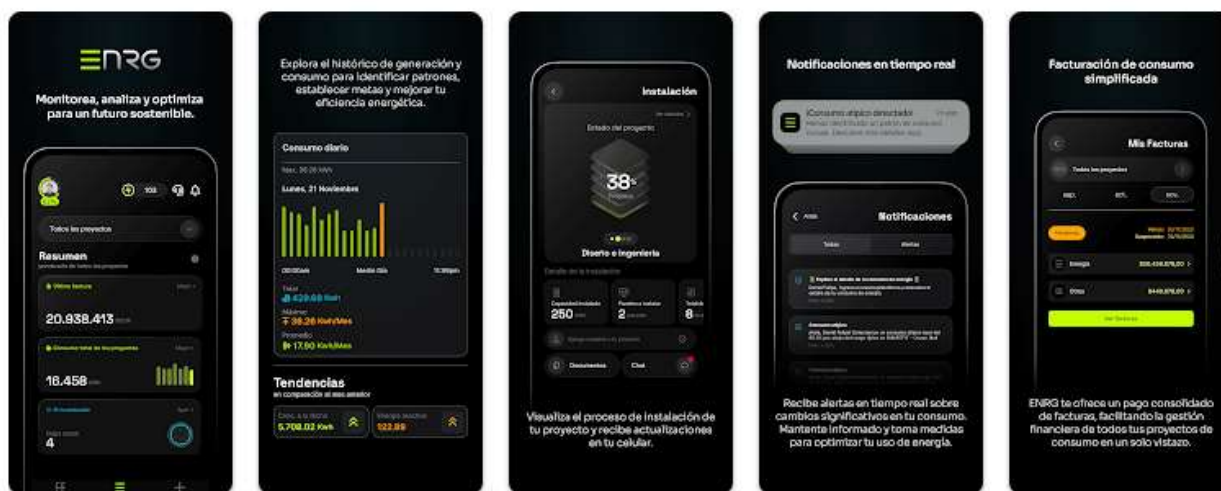
### Dimensiones y puntos de fijación (en mm)



Nota. Tomado de <https://www.ineldec.com.co/MCO-976342572-contador-medidor-trifasico-elster-a1800-semidirecta-indirect- JM>

**Figura 16.**

*Programa de medición en tiempo real de producción de energía del sistema fotovoltaico.*



*Nota.* Tomado de [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nextenergyutility.NEU&hl=es\\_CO](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nextenergyutility.NEU&hl=es_CO)

El protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) constituye la base fundamental para la comunicación y el monitoreo remoto de los sistemas fotovoltaicos de la Institución Universitaria Pascual Bravo. En este contexto específico, la aplicación desarrollada por Erco Energy, una filial del operador de red de Antioquia, Empresas Públicas de Medellín (EPM), aprovecha la infraestructura de red basada en TCP/IP para ofrecer una solución integral de supervisión en tiempo real del rendimiento de la instalación solar.

Esta implementación permite una visibilidad operativa detallada, proporcionando datos actualizados sobre la generación de energía del sistema fotovoltaico. A través de la interfaz de la aplicación, se pueden visualizar parámetros clave de rendimiento, tales como la potencia instantánea generada, la energía acumulada diaria, el voltaje y la corriente de los inversores, e incluso la irradiación solar en tiempo real (si se dispone de los sensores adecuados).

La capacidad de acceder a históricos de producción es otra funcionalidad crucial de este sistema. Los usuarios pueden descargar informes detallados de la energía generada en períodos específicos, ya sean mensuales o anuales. Este análisis retrospectivo resulta invaluable para evaluar la eficiencia del sistema fotovoltaico a lo largo del tiempo, identificar posibles variaciones

en el rendimiento asociadas a las condiciones climáticas estacionales, el mantenimiento de los paneles, o incluso la degradación natural de los componentes.

Más allá del simple monitoreo, un sistema basado en TCP/IP abre la puerta a funcionalidades avanzadas en futuras etapas. Podría permitir la integración con sistemas de gestión de energía más amplios, la implementación de alertas automáticas ante fallos o rendimientos anómalos, e incluso la optimización remota de ciertos parámetros del sistema (si los equipos lo permiten y las regulaciones lo autorizan).

En resumen, la adopción de TCP/IP por parte de Erco Energy para la monitorización de los sistemas fotovoltaicos de la Institución Universitaria Pascual Bravo representa una estrategia inteligente y moderna, que facilita la supervisión continua, el análisis del rendimiento histórico y sienta las bases para futuras funcionalidades de gestión y optimización de la generación solar. Esta capacidad de obtener datos precisos y en tiempo real es fundamental para garantizar la eficiencia operativa y la rentabilidad a largo plazo de la inversión en energía solar.

#### **Análisis comparativo de generación energética: datos reales vs. Simulación por variación de HSP.**

El análisis de generación energética mensual del sistema fotovoltaico de la institución universitaria Pascual Bravo, representado en la *Figura 17*, muestra una producción total de 7276,16 kWh entre enero y octubre de 2023, con un promedio mensual de 727,62 kWh y un máximo de 825,35 kWh en julio. Estos valores, obtenidos mediante un sistema de monitoreo digital en tiempo real proporcionado por el software de Erco Energy, reflejan un comportamiento operativo estable del sistema on-grid instalado, aunque condicionado por la variabilidad estacional de la radiación solar y otros factores ambientales o técnicos.

Para validar y contrastar este comportamiento, se desarrollaron dos simulaciones (*Figura 18 y Figura 19*) con base en la *Tabla 4*, en la cual se estimó la producción mensual considerando los valores mínimos y máximos de Horas Solar Pico (HSP) según datos históricos para la ciudad de Medellín. Esta modelación permite proyectar escenarios energéticos extremos: el primero (HSP mínimo) representa condiciones adversas de irradiación, mientras que el segundo (HSP máximo) plantea el potencial de generación óptimo del sistema.

**Figura 17.**

Panel de monitoreo de generación de energía solar.



Nota. Tomado de <https://erco.energy/co>

**Tabla 4.**

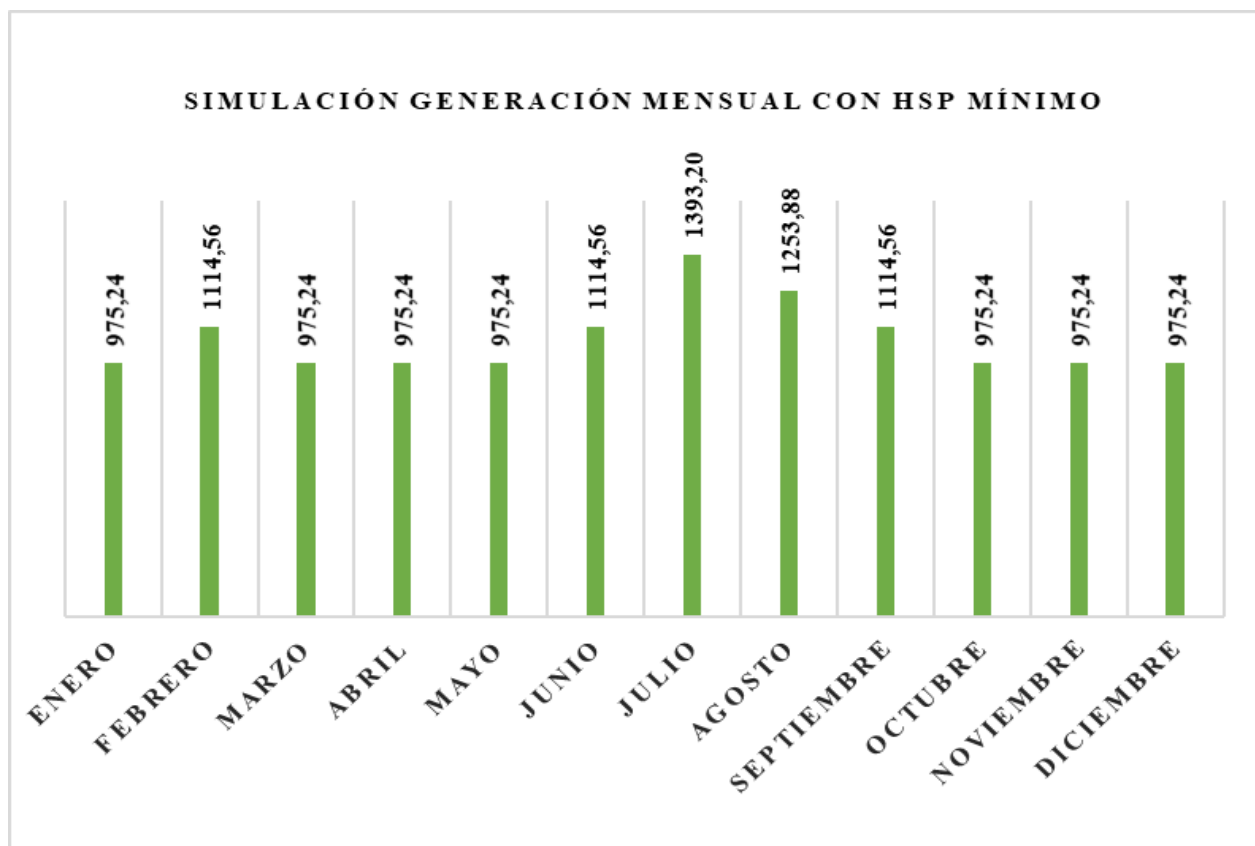
Generación de energía mensual con variación de HSP.

Mes	Hsp min	Hsp máx.	# Paneles	kwh/m - min	kwh/m - máx
Enero	3,5	4	387	975,24	1114,56
Febrero	4	4,5	387	111,46	1253,88
Marzo	3,5	4	387	975,24	1114,56
Abril	3,5	4	387	975,24	1114,56
Mayo	3,5	4	387	975,24	1114,56
Junio	4	4,5	387	975,24	1253,88
Julio	5	5,5	387	1114,56	1532,52
Agosto	4,5	5	387	1393,20	1393,20
Septiembre	4	4,5	387	1114,56	1253,88
Octubre	3,5	4	387	975,24	1114,56
Noviembre	3,5	4	387	975,24	1114,56
Diciembre	3,5	4	387	975,24	1114,56

Nota. Fuente diseño propio.

**Figura 18.**

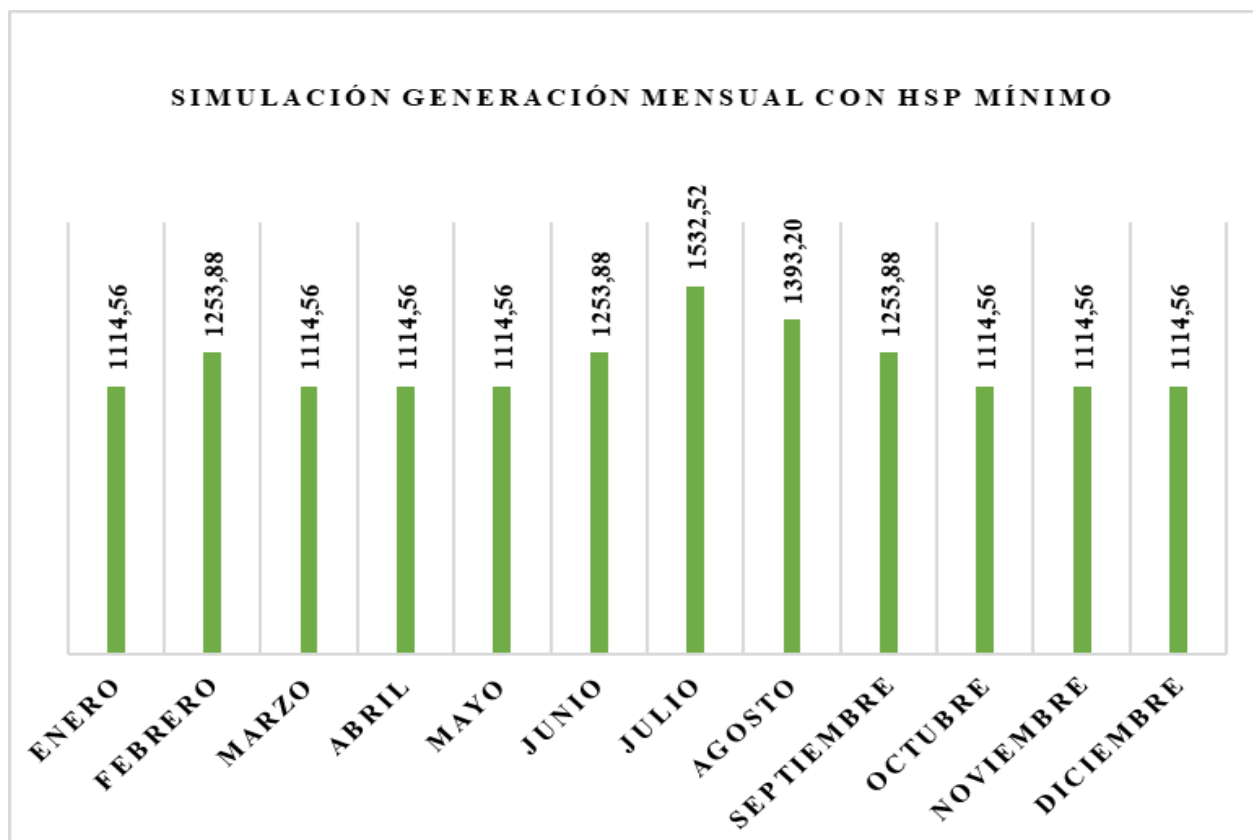
*Generación de energía mensual con HSP min.*



*Nota.* Fuente diseño propio.

**Figura 19.**

*Generación de energía mensual con HSP min.*



*Nota.* Fuente diseño propio.

Al comparar los datos reales con las simulaciones, se evidencian los siguientes aspectos críticos:

1. **Consistencia con el escenario HSP mínimo:** La generación mensual real se encuentra generalmente dentro del rango proyectado por el modelo con HSP mínimos, lo cual valida que el sistema está funcionando correctamente, aunque sin alcanzar su capacidad máxima teórica. Esta concordancia sugiere que las condiciones climáticas durante el periodo de análisis estuvieron más cercanas al umbral inferior de radiación.
2. **Brecha frente al escenario HSP máximo:** Existe una diferencia significativa entre la generación real y los valores proyectados en el escenario de HSP alto, especialmente en

los meses de mayor irradiación (julio y agosto). Esta diferencia puede atribuirse a factores como:

- Sombras parciales o suciedad en los módulos.
- Desalineaciones en la inclinación u orientación de los paneles.
- Pérdidas térmicas, eléctricas o por desbalance en strings.
- Eficiencia del inversor y otros elementos del sistema.

3. **Importancia de la simulación para la toma de decisiones:** La comparación entre los datos empíricos y las simulaciones es fundamental para:

- Evaluar el grado de aprovechamiento real del recurso solar disponible.
- Identificar márgenes de mejora técnica en mantenimiento, limpieza o rediseño del sistema.
- Proyectar con mayor precisión el retorno de inversión (ROI) bajo distintos escenarios climáticos.

4. **Julio como mes crítico:** En todas las representaciones (real y simulada), julio se destaca como el mes de mayor potencial de generación, lo que se alinea con el comportamiento solar típico de la región y refuerza la necesidad de priorizar la operación óptima del sistema durante este mes para maximizar beneficios energéticos y económicos.

Una comprensión profunda de cómo se desempeña la instalación actual en relación con otras posibles configuraciones y tecnologías de paneles, es el punto de partida para trazar el camino hacia una mayor eficiencia y sostenibilidad. En este sentido, y basándose en cálculos como la estimación de energía producida dada en la siguiente ecuación, podemos realizar un análisis más detallado del sistema.

$$\#P = E / Wp * Hsp * Pr$$

$$\#P = \frac{E_{\text{anual}}}{Wp * Hsp * Pr * \#días} = \frac{19412kW}{625w * 4.2 * 0.8 * 30} = 308 \text{ paneles mono cristalinos}$$

En el análisis económico de la adquisición de paneles solares, se considera un escenario teórico con paneles de las características calculadas, cuyo valor unitario estimado es de \$500.000. Para una instalación de 308 unidades, esto implicaría una inversión de \$154.000.000. En contraste, la infraestructura fotovoltaica existente en la Institución Universitaria Pascual Bravo comprende dos tipos de paneles: 162 unidades de 545 W, con un costo individual aproximado de \$450.000 y un valor total de \$72.900.000; y 225 unidades de 415W, con un precio unitario cercano a \$390.000 y un valor agregado de \$87.750.000. En conjunto, la inversión económica realizada por la Institución Universitaria Pascual Bravo en su actual instalación de paneles solares asciende a [\\$160.650.000](#).

Desde la perspectiva del análisis económico de proyectos fotovoltaicos, la evaluación comparativa entre la inversión teórica y la real revela un ahorro directo de capital de \$6.650.000 al optar por la configuración actual de paneles en la Institución Universitaria Pascual Bravo. Sin embargo, la ventaja económica más significativa inherente a esta elección radica en la optimización del espacio de instalación y la consecuente reducción en los costos asociados a la infraestructura de soporte. La menor cantidad de paneles de mayor potencia, aunque con una inversión inicial ligeramente superior en el escenario teórico, implica una disminución sustancial en la superficie requerida y la complejidad de la estructura de montaje, lo que se traduce en ahorros indirectos considerables en materiales y mano de obra.

Desde una perspectiva de ingeniería económica y diseño de sistemas fotovoltaicos, la adopción de paneles de mayor potencia presenta beneficios significativos. Si bien el costo unitario de paneles más potentes puede ser elevado, la disminución en la cantidad total de módulos necesarios impacta directamente en la superficie de instalación requerida. Esto se traduce en un menor despliegue de estructuras de montaje (rieles, soportes, anclajes), lo que a su vez reduce los costos de materiales, mano de obra de instalación y los tiempos de ejecución del proyecto.

Además, una menor cantidad de paneles implica una reducción en la complejidad del cableado de corriente continua (CC), lo que puede disminuir las pérdidas de energía y los costos asociados a los componentes de conexión y protección en el lado CC. También se podría optimizar la cantidad de inversores o la configuración de los mismos, generando ahorros adicionales en el costo total del sistema.

Por lo tanto, si bien la diferencia de capital directa en la adquisición de los paneles podría parecer modesta en este análisis puntual, la consideración de paneles de mayor potencia se justifica principalmente por la eficiencia en el uso del espacio disponible y la potencial reducción significativa en los costos indirectos asociados a la estructura de soporte y la instalación general del sistema fotovoltaico en futuras ampliaciones para la Institución Universitaria Pascual Bravo. Un análisis detallado de los costos por vatio instalado y los costos de infraestructura para diferentes tecnologías de paneles será crucial para tomar decisiones informadas.

Si bien un inversor de potencia nominal idéntica no alterará la capacidad máxima de conversión de energía del sistema, existen otros parámetros críticos del inversor que sí pueden influir significativamente en el rendimiento global y la eficiencia de la instalación fotovoltaica.

Factores como la eficiencia de conversión a diferentes niveles de carga, el rango de voltaje de entrada MPPT (Máximo Power Point Tracking), la topología del inversor, la calidad de la onda de salida, las características de protección integradas, la capacidad de comunicación y monitoreo, y la fiabilidad y vida útil esperada son aspectos diferenciadores entre distintos modelos de inversores de la misma potencia nominal.

Por ejemplo, un inversor con un rango de voltaje MPPT más amplio puede optimizar la captación de energía en diversas condiciones de irradiación y temperatura de los paneles.

Asimismo, una mayor eficiencia de conversión se traduce directamente en menores pérdidas de energía y, por ende, una mayor producción de energía útil para la carga o la inyección a la red. Las características de protección (contra sobretensiones, sobre corriente, cortocircuitos, etc.) son fundamentales para la seguridad y la longevidad del sistema. Finalmente, las capacidades de comunicación permiten el monitoreo del rendimiento y la detección temprana de posibles fallos.

Por lo tanto, aunque la potencia nominal del inversor sea un parámetro fundamental para dimensionar el sistema, la selección de un inversor no debe basarse únicamente en este valor. Una evaluación exhaustiva de las especificaciones técnicas y la calidad del inversor es crucial para garantizar un rendimiento óptimo, la seguridad y la durabilidad de la instalación fotovoltaica. La variabilidad entre diferentes modelos de inversores, incluso con la misma potencia nominal, puede tener implicaciones significativas en la eficiencia, la confiabilidad y los costos operativos a largo plazo del sistema.

Para determinar el ahorro energético que está logrando la Institución Universitaria Pascual Bravo con el sistema solar instalado se determina multiplicando la cantidad de energía producida en promedio mensual el cual es de 19.412 kwh/mes por el valor de kw/h que cobra el operador de red, en este caso EPM con una tarifa industrial de \$923.2, lo cual equivale a \$17.921.158 de ahorro monetario. En este contexto, y con el fin de optimizar los sistemas de generación fotovoltaica existentes, se plantean las siguientes propuestas de mejora:

**Optimización del Monitoreo y Análisis de Rendimiento:** Dada la superioridad del factor de rendimiento (Pr) del sistema actual, se propone implementar un monitoreo avanzado por etapa y tipo de panel. Esto permitirá correlacionar la producción energética con las condiciones ambientales, identificando factores de alta eficiencia para validar modelos predictivos y optimizar futuras expansiones.

**Análisis Integral de Inversión y Sostenibilidad a Largo Plazo:** Más allá de la inversión inicial, se debe realizar un análisis de ciclo de vida (LCA) y costo total de propiedad (TCO) para futuras ampliaciones o renovaciones. Este estudio considerará la degradación de componentes, costos de operación y mantenimiento, vida útil de los equipos y evolución tarifaria. El fin es identificar configuraciones que maximicen el ROI y minimicen el LCOE, asegurando decisiones de inversión eficientes y sostenibles.

**Estandarización y Diseño Eficiente para Futuras Ampliaciones:** Aprovechando la optimización de espacio y reducción de costos indirectos lograda con paneles de mayor potencia, se propone estandarizar la selección de módulos con altas eficiencias por área y potencias nominales superiores, siempre que sea costo-efectivo. Adicionalmente, se investigará e implementará tecnologías de montaje más eficientes, como sistemas de alta densidad o BIPV, para maximizar la generación en los espacios disponibles.

## 7. Conclusiones

La eficiencia operativa del sistema actual es notable, generando una alta producción energética incluso con una irradiación solar promedio local que, según los datos manejados, es inferior a la regional. Esto sugiere que el factor de rendimiento (Pr) del sistema está operando de manera óptima. Por ello, se propone implementar un sistema de monitoreo de mayor resolución por cada etapa y tipo de panel. Esto permitiría establecer una correlación precisa entre la energía generada, las condiciones ambientales en tiempo real y las características específicas de cada módulo, para así modelar con mayor exactitud el Pr y aplicar este conocimiento en futuras ampliaciones.

A pesar de los ahorros actuales, es crucial realizar un análisis de ciclo de vida (LCA) y costo total de propiedad (TCO) para futuras configuraciones. Esto permitirá maximizar el retorno de inversión (ROI) y minimizar el costo nivelado de energía (LCOE), asegurando la rentabilidad a largo plazo.

Se debe capitalizar la ventaja de optimización de espacio y reducción de costos indirectos lograda con paneles de mayor potencia. Esto implica estandarizar la selección de paneles de alta eficiencia y potencias superiores, e investigar tecnologías de montaje más eficientes para maximizar la generación en el espacio disponible.

Para la sostenibilidad institucional, es indispensable un plan estratégico de gestión energética a largo plazo. Este plan debe integrar almacenamiento y gestión inteligente, impulsando eficiencia y rentabilidad, y sirviendo como plataforma de aprendizaje para la comunidad universitaria.

## 8. Recomendaciones

En futuras ampliaciones o instalaciones de nuevos sistemas fotovoltaicos en la Institución Universitaria Pascual Bravo, consideramos crucial adoptar un enfoque sistemático y multidisciplinario. Esto implica la evaluación exhaustiva de criterios técnicos, económicos, ambientales, operativos y estratégicos para garantizar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad de cada proyecto. La correcta ponderación de estos aspectos permitirá optimizar la inversión, maximizar la generación de energía limpia y contribuir significativamente a los objetivos de sostenibilidad de la institución, a continuación, se mencionan algunos criterios a considerar:

### Criterios Técnicos:

- Demanda Energética: Analizar consumo actual y futuro para dimensionar la expansión.
- Potencial Solar: Evaluar la radiación y sombras en nuevas ubicaciones.
- Paneles: Seleccionar tecnología por eficiencia, costo, durabilidad y garantía.
- Inversores: Elegir por eficiencia, confiabilidad, compatibilidad y monitoreo.
- Diseño e Instalación: Optimizar captación, elegir estructuras seguras y accesibles.
- Integración a Red: Evaluar capacidad eléctrica existente y requisitos del operador.

### Criterios Económicos:

- Costo-Beneficio (ROI): Analizar inversión, ahorros, retorno y financiación.
- Modelos de Financiamiento: Explorar opciones (propios, préstamos, PPA).
- Análisis de Sensibilidad: Evaluar riesgos por cambios en variables clave.

### Criterios de Sostenibilidad:

- Ciclo de Vida: Considerar impacto ambiental de componentes.
- Huella de Carbono: Cuantificar reducción de emisiones.
- Biodiversidad y Paisaje: Minimizar impactos negativos.

#### Criterios de Gestión y Operación:

- Mantenimiento: Planificar tareas preventivas y correctivas.
- Monitoreo: Seleccionar sistemas para seguimiento y detección de fallas.
- Capacitación: Formar personal para operación y mantenimiento.

#### Criterios Estratégicos:

- Alineación Estratégica: Conectar con objetivos de sostenibilidad y ahorro.
- Flexibilidad: Diseñar para futuras expansiones o integración con otras energías.
- Participación: Involucrar a la comunidad universitaria.

## 9. Referencias bibliográficas

- Álvarez, J., & Torres, M. (2023). *Sistemas de energía renovable en entornos educativos: Una aproximación práctica*. Editorial Universitaria.
- González, F. (2023). *Impacto de las energías renovables en instituciones educativas: Un estudio de caso*. *Energía y Sostenibilidad*.
- López, R., & García, A. (2021). *Energía solar fotovoltaica: Perspectivas y beneficios para el medio ambiente*. *Ciencia y Energía*.
- Martínez, P., & Suárez, T. (2022). *Análisis comparativo de tecnologías fotovoltaicas en universidades*. *Energía Renovable y Educación*.
- Pérez, H., Ramírez, S., & Velasco, C. (2021). *Estudios en eficiencia energética y sostenibilidad*. *Revista Internacional de Energía Sostenible*.
- Ruiz, L. (2020). *Cambio climático y educación: El rol de las universidades en la transición energética*. Editorial Innovación y Desarrollo.