



# Estudio del desempeño del sistema fotovoltaico de 3.25 kWp de la UNCP en la ciudad de Huancayo – Perú y su comparación con modelos de cálculo tradicionales

## Performance Analysis of UNCP 3.25 kWp PV System and traditional modeling methods in Huancayo - Perú

Boris Ernesto D'Angles Woolcott<sup>1</sup> / Percy Humberto Cueva Ríos<sup>1</sup> / Wilar Tito Orellana Mendoza<sup>1</sup>



0000-0003-1339-6430 / 0000-0002-0065-1669 / 0000-0002-3505-9980

**Autor correspondal:** [bedangles@uncp.edu.pe](mailto:bedangles@uncp.edu.pe)  
[pcueva@uncp.edu.pe](mailto:pcueva@uncp.edu.pe) / [wtorellana@uncp.edu.pe](mailto:wtorellana@uncp.edu.pe)

### Cómo citar:

D'Angles Woolcott, B. E.; Cueva Ríos, P. H. & Orellana Mendoza, W. T. (2021). *Estudio del desempeño del sistema fotovoltaico de 3.25 kWp de la UNCP en la ciudad de Huancayo – Perú y su comparación con modelos de cálculo tradicionales*. *Prospectiva Universitaria*, revista de la UNCP. 18(1), 75-76. <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2021.18.1417>

### Resumen

En el año 2018, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) de Perú con apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) instalaron sistemas fotovoltaicos de 3.25 kW de potencia en sus infraestructuras de diferentes lugares del Perú, siendo una de las ubicaciones seleccionadas las de la UNCP. Por ello, esta investigación tuvo por objetivo determinar el desempeño del sistema fotovoltaico instalado en los ambientes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNCP en la ciudad de Huancayo con respecto a modelos de cálculo convencionales. Teniendo en cuenta que, este sistema fotovoltaico opera en medio de los Andes centrales de Perú a una altitud superior a los 3200 msnm. Se ha analizado los datos de producción de energía de un año y se han comparado con los resultados de cálculos teóricos, con el fin de introducir mejoras a los modelos de cálculo para futuros sistemas fotovoltaicos que se diseñen y construyan en esta región considerando condiciones climatológicas, técnicas y económicas. La metodología utilizada tiene un alcance descriptivo – correlacional, con una recopilación de datos cuantitativos provenientes de los registros de producción de energía del sistema, uso de datos históricos de radiación solar y un análisis estadístico correlacional mediante el coeficiente de correlación de Pearson utilizando software especializado. Los resultados mostraron que los ajustes propuestos para los métodos tradicionales mejoran el cálculo de la producción de energía, haciendo que los valores calculados se ajusten a los reales.

**Palabras clave:** energía solar, sistema fotovoltaico, estudio de desempeño, producción energética, suministro eléctrico, huella de carbono

### Abstract

In 2018, Peru's Ministry of Energy and Mines (MEM), with support from the United Nations Development Program (UNDP), installed 3.25 kW photovoltaic systems in its infrastructures in different parts of Peru, with one of the selected locations being those of the UNCP. Therefore, this research aimed to determine the performance of the photovoltaic system installed in the environments of the Faculty of Electrical and Electronic Engineering of the UNCP in the city of Huancayo with respect to conventional calculation models. Taking into account that, this photovoltaic system operates in the middle of the central Andes of Peru at an altitude above 3,200 meters above sea level. The energy production data for one year has been analyzed and compared with the results of theoretical calculations, in order to introduce improvements to the calculation models for future photovoltaic systems that are designed and built in this region considering climatic, technical and economic conditions. The methodology used has a descriptive-correlational scope, with a collection of quantitative data from the system's energy production records, use of historical solar radiation data and a correlational statistical analysis using the Pearson correlation coefficient using specialized software. The results showed that the adjustments proposed for traditional methods improve the calculation of energy production, making the calculated values adjust to the real ones.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic system, performance study, energy production, electricity supply, carbon footprint

<sup>1</sup>Docentes de la Fac. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - UNCP

## Introducción

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) de Perú, con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), ha sumado esfuerzos contra el cambio climático y la conservación del medio ambiente, a través de la instalación de un sistema fotovoltaico en sus instalaciones, el cual abastece de energía eléctrica a distintas áreas de trabajo de la Dirección General de Eficiencia Energética (DGEE) (MEM, 2018). Así, en el año 2018 el MEM realizó la instalación de un sistema fotovoltaico de 3.25 kWp de potencia colocado en la terraza que da sobre el edificio de laboratorios de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNCP; el cual, ha venido funcionando con un sistema conectado a red que inyecta toda la energía producida para suministrar electricidad a algunos laboratorios y oficinas administrativas, por lo que, a la fecha, se cuentan con datos de irradiación y de producción de energía del sistema durante un periodo comprendido entre el 2019 y 2021.

### Figura 1

*Sistema Fotovoltaico de 3.5 kW de la UNCP.*



Por otra parte, D'Angles (2020), en su investigación realizó simulaciones de desempeño de una planta fotovoltaica, ubicada en el valle del Mantaro, con el objetivo de determinar los parámetros que influyen en el desempeño de sistemas fotovoltaicos en el valle del Mantaro y, así poder estimar la producción de energía anual; finalmente, la investigación evidenció la existencia de parámetros climatológicos que influían en la producción de energía de la planta. Entre estos parámetros, destacan los climatológicos, los cuales varían considerablemente en los valles andinos, caracterizados por nubosidad y lluvias en los meses de verano, así como bajas temperaturas a lo largo del año. Sin embargo, en la investigación de D'Angles, los datos obtenidos de producción de energía solo fueron fruto de simulaciones basadas en datos meteorológicos reales, considerando factores de pérdida estándar adaptados a juicio del investigador, los cuales, a través de un método deductivo, intentaron estimar la producción de energía de una planta fotovoltaica en el valle del Mantaro, partiendo de conocimientos generales. En el presente caso, basados en dicha experiencia, se

plantea hacer lo contrario; es decir, que contando con los datos de producción de energía y datos meteorológicos de la zona de estudio, se propone de forma inductiva, predecir el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos en el valle del Mantaro y zonas de climas similares, contrastando los datos del sistema de estudio con los cálculos obtenidos por modelos matemáticos estándar.

Por ello, esta investigación tuvo como objetivo general determinar el desempeño del sistema fotovoltaico de 3.25 kW instalado en los ambientes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNCP, en la ciudad de Huancayo, con respecto a los valores calculados con el uso de modelos de cálculo convencionales. Así también, en el desarrollo del estudio se ha propuesto, como objetivos secundarios, analizar la influencia de los parámetros climatológicos en el desempeño del sistema, determinar los factores que condicionan la optimización del sistema y determinar la contribución del sistema fotovoltaico en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

## Justificación del estudio

La generación fotovoltaica se ha ido incrementando en todo el mundo como una alternativa importante de producción de energía; por tanto, se hacen necesarios estudios para prever el impacto de la inclusión de este tipo de energía en la red (Lemes et al., 2019). Así también, se puede afirmar que el desarrollo sostenible del país depende de la utilización de la producción de energía a partir de fuentes de energía renovables, como la solar, eólica, hidráulica, etc. Debido a la disponibilidad de energía solar en la mayoría de los lugares, el enfoque del uso de energía solar mediante la implementación de sistemas solares fotovoltaicos; por ello, se hacen necesario los paneles, como estrategia principal. Por tanto, un adecuado diseño de los sistemas fotovoltaicos evitan pérdidas de generación y optimizan los sistemas (Das et al., 2021).

Existen varios factores que influyen en la reducción de la potencia de salida de la energía fotovoltaica. Esto podría ser un sombreado parcial, las condiciones ambientales y la temperatura de las celdas. Estos elementos introducen un punto de acceso que puede dañar las células del módulo (Ahmadzai & Varshney, 2021). Así también, el desempeño de los sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Huancayo está condicionado por ciertos factores climatológicos que afectan su desempeño durante los meses de lluvias, los cuales caracterizan a los valles interandinos (D'Angles, 2020).

Como parte de los compromisos internacionales asumidos por el Perú en el convenio marco de Naciones Unidas sobre cambio climático, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) lanzó el Proyecto de Acciones Nacionales Apropriadadas de Mitigación (NAMA por sus siglas en inglés) en los sectores de generación de energía, con el objetivo de reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el país (Diario Gestión, 2018).

## Materiales y métodos

### El sistema fotovoltaico de 3.25 kW de la UNCP

El sistema está compuesto por diez paneles solares de tipo policristalino de la marca Canadian Solar CS6U-325 de 325 W de potencia pico, con una eficiencia de 16.72 %, los cuales están conectados a un inversor trifásico Sunny Tripower 5000 TL de la marca SMA, el cual es un inversor para uso con conexión a red; es por ello que, toda la energía producida por el sistema es vertida en su totalidad al sistema de distribución de energía de la universidad. Adicionalmente, el sistema cuenta con un conjunto de dispositivos de protección contra el corto circuito y las sobretensiones transitorias, así como de control de vertido a la red eléctrica.

#### Figura 2

Inversor y tablero de protección ubicados bajo el conjunto de paneles en el sistema fotovoltaico de 3.5 kW de la UNCP.



El sistema cuenta con una estructura metálica fija con una inclinación de 15.7° y orientación norte, que asegura la estabilidad de los paneles y de los equipos de potencia y de protección.

La Tabla 1 muestra los valores de la ficha técnica del panel solar Canadian Solar CS6U-325, los que han sido necesarios para realizar los cálculos teóricos que se muestran en la sección de Resultados.

**Tabla 1**

Datos de del Panel Canadian Solar CS6U 325, según ficha técnica del fabricante.

| Canadian Solar CS6U 325                  |        |      |
|--|--------|------|
| Potencia máxima (Pmax)                   | 325    | W    |
| Corriente punto de máxima potencia (Imp) | 8.78   | A    |
| Tensión punto de máxima potencia (Vmp)   | 37     | V    |
| Corriente de corto circuito (Isc)        | 9.34   | A    |
| Tensión a circuito abierto (Voc)         | 45.5   | V    |
| Coefficiente de temperatura a PMAX       | -0.41  | %/°C |
| Coefficiente de temperatura de (Isc)     | -0.053 | %/°C |

|  |                |      |
|--|----------------|------|
| Coefficiente de temperatura (Voc)            | -0.31          | %/°C |
| Temperatura máxima de operación de la célula | 45             | °C   |
| Cantidad de células por panel                | 72 (6x12)      | Und  |
| Dimensiones                                  | 1960x992x40    | mm   |
| Peso   | 22.4           | Kg   |
| Rendimiento                                  | 16.72          | %    |
| Máxima tensión de operación                  | 1000           | V    |
| Tipo de panel                                | Policristalino |      |

Cabe mencionar que, el sistema de la red eléctrica de la UNCP es trifásico de 220 V con conexión en delta, pero el inversor SMA tiene una salida trifásica de 400/230 V, según las normas europeas; por lo cual, se ha instalado un transformador de 5kVA para adecuar la salida del inversor a la red eléctrica de la universidad.

### Métodos de recopilación de datos

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, se ha realizado la recopilación de los datos de producción de energía del sistema mediante guías de observación de campo, de dos maneras diferentes:

- A través de una recopilación de datos de la memoria interna del inversor.
- A través del portal web del Proyecto NAMA del Ministerio de Energía y Minas.

A continuación, se muestra la Tabla 2 con los valores mensuales de producción de energía de los años 2020 y 2021:

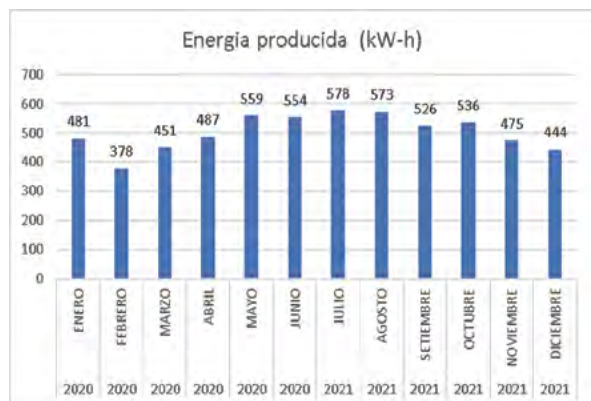
**Tabla 2**

Producción de energía mensual del sistema fotovoltaico de 3.25 kW de la UNCP.

| Año  | Mes       | Energía mensual (kW-h) | Energía diaria (kW-h) |
|------|-----------|------------------------|-----------------------|
| 2020 | Enero     | 481                    | 15.52                 |
| 2020 | Febrero   | 378                    | 13.50                 |
| 2020 | Marzo     | 451                    | 14.55                 |
| 2020 | Abril     | 487                    | 16.23                 |
| 2020 | Mayo      | 559                    | 18.03                 |
| 2020 | Junio     | 554                    | 18.47                 |
| 2021 | Julio     | 578                    | 18.65                 |
| 2021 | Agosto    | 573                    | 18.48                 |
| 2021 | Setiembre | 526                    | 17.54                 |
| 2021 | Octubre   | 536                    | 17.88                 |
| 2021 | Noviembre | 475                    | 15.83                 |
| 2021 | Diciembre | 444                    | 14.32                 |

**Figura 3**

Energía producida por el sistema fotovoltaico de 3.25 KW, ubicado en la UNCP durante los años 2020- 2021.



Se ha realizado una investigación documental para la recopilación de datos históricos de irradiancia sobre la ciudad de Huancayo, los cuales han sido utilizados para los cálculos de valores teóricos de producción de energía en la sección de resultados.

**Tabla 3**

Valores de irradiancia mensual de diferentes fuentes para la ciudad de Huancayo.

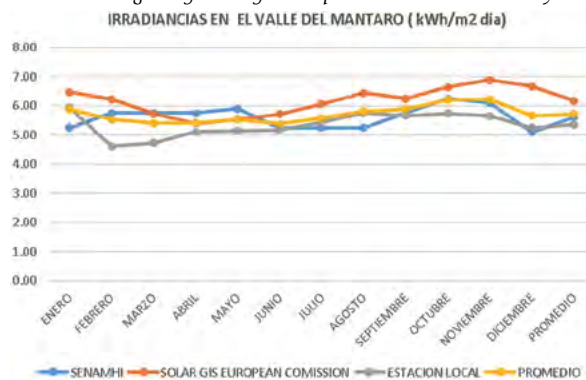
| Mes             | Senamhi     | Solar Gis European Comission | Estación local | Promedio    |
|-----------------|-------------|------------------------------|----------------|-------------|
| Enero           | 5,25        | 6,47                         | 5,73           | 5,82        |
| Febrero         | 5,75        | 6,22                         | 4,64           | 5,54        |
| Marzo           | 5,75        | 5,73                         | 4,73           | 5,40        |
| Abril           | 5,75        | 5,39                         | 5,11           | 5,42        |
| Mayo            | 5,90        | 5,54                         | 5,15           | 5,53        |
| Junio           | 5,25        | 5,71                         | 5,18           | 5,38        |
| Julio           | 5,25        | 6,06                         | 5,44           | 5,58        |
| Agosto          | 5,25        | 6,44                         | 5,62           | 5,77        |
| Setiembre       | 5,75        | 6,24                         | 5,66           | 5,88        |
| Octubre         | 6,25        | 6,64                         | 5,94           | 6,28        |
| Noviembre       | 6,10        | 6,89                         | 5,72           | 6,24        |
| Diciembre       | 5,10        | 6,66                         | 5,25           | 5,67        |
| <b>Promedio</b> | <b>5,61</b> | <b>6,17</b>                  | <b>5,35</b>    | <b>5,71</b> |

Fuente: D'Angles (2020).

La Tabla 3 muestra valores de irradiancia promedio mensual de diferentes fuentes, como Senamhi, Solar Gis de la European Comission y de una estación local de la Universidad Continental de Huancayo. Adicionalmente, la tabla muestra una columna con valores promedio de las tres fuentes consideradas, en base a los cuales se realizaron los cálculos para el modelamiento.

**Figura 4**

Irradiancias según diferentes fuentes para la ciudad de Huancayo.



Fuente: D'Angles (2020).

Para la evaluación de los factores climatológicos que influyen en el desempeño del sistema fotovoltaico de 3 kW, se ha recopilado información climatológica de una estación local ubicada en las instalaciones de la Universidad Continental de Huancayo y PVGIS de la European Comission; para ello, se utilizaron discrecionalmente los factores climatológicos de irradiancia, precipitación y temperatura propuestos por D'Angles (2020). Los datos de irradiancia se muestran, previamente, en la Tabla 3.

Los valores promedio de temperatura registrados en la ciudad de Huancayo, según PV GIS, han sido de 11.19 °C, dichos datos están basados en promedios históricos de hace 20 años, proporcionados por el Senamhi. Sin embargo, en los últimos años, debido al incremento global de las temperaturas, la estación meteorológica de la Universidad Continental ha proporcionados valores más elevados, los cuales se muestran a continuación en la Tabla 4.

**Tabla 4**

Temperaturas promedio mensuales para la ciudad de Huancayo, registradas por la estación meteorológica de la UC en el año 2015.

| Mes                   | Temperatura °C |       |              |
|-----------------------|----------------|-------|--------------|
|                       | Mín.           | Máx.  | Promedio     |
| Enero                 | 5,15           | 26,84 | 16,00        |
| Febrero               | 7,19           | 24,29 | 15,74        |
| Marzo                 | 6,18           | 25,84 | 16,01        |
| Abril                 | 6,00           | 22,75 | 14,38        |
| Mayo                  | 5,87           | 22,42 | 14,15        |
| Junio                 | 1,62           | 22,59 | 12,11        |
| Julio                 | 2,00           | 22,00 | 12,00        |
| Agosto                | 2,10           | 23,62 | 12,86        |
| Setiembre             | 4,97           | 24,85 | 14,91        |
| Octubre               | 5,90           | 25,40 | 15,65        |
| Noviembre             | 5,15           | 26,84 | 16,00        |
| Diciembre             | 5,25           | 26,34 | 15,80        |
| <b>Promedio Anual</b> |                |       | <b>14,63</b> |

Fuente: D'Angles (2020).

Nota: Elaborado con datos de la estación meteorológica de la Universidad Continental.

**Tabla 5**

Precipitación acumulada anual, para el año 2015 en la ciudad de Huancaayo.

| Mes              | Precipitación (mm) |
|------------------|--------------------|
| Enero            | 86,50              |
| Febrero          | 148,00             |
| Marzo            | 58,42              |
| Abril            | 58,42              |
| Mayo             | 11,60              |
| Junio            | 13,15              |
| Julio            | 18,67              |
| Agosto           | 7,07               |
| Setiembre        | 8,80               |
| Octubre          | 54,25              |
| Noviembre        | 67,00              |
| Diciembre        | 113,91             |
| <b>Acumulado</b> | <b>645,79</b>      |

Fuente: D'Angles (2020).

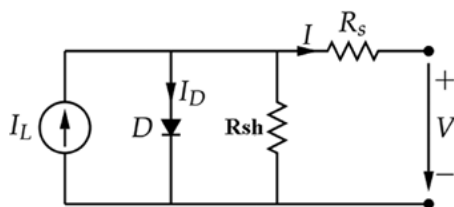
Nota: Elaborado con datos de la estación meteorológica de la Universidad Continental.

### Métodos de cálculo para el modelamiento

El modelo de un diodo propuesto por Gow & Manning (1996), ha sido descrito en varias publicaciones, como la de Perpiñán (2020), quien explica que el comportamiento de la célula fotovoltaica se puede representar como una equivalencia de una fuente de corriente con un diodo en paralelo que aparece cuando se juntan dos materiales semiconductores en la unión P y N; así también, se puede apreciar dos resistencias, Rsh o resistencia Shunt, la cual es causada por las impurezas cercanas a la unión de semiconductores y que puede tomar valores típicos de entre 200  $\Omega$  a 800  $\Omega$  y una resistencia Rs, la que aparece como consecuencia del volumen del material y de los contactos, con valores que pueden variar entre 0.05  $\Omega$  y 0.3  $\Omega$ .

**Figura 5**

Modelo de célula fotovoltaica propuesta por Gow & Manning (1996).



$$I_D = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{e} \quad (2)$$

La cuantificación de la energía del generador fotovoltaico está directamente relacionada con la irradiación incidente para diferentes periodos temporales, y se puede calcular a través de las medias mensuales. Así también, existen métodos de cálculo, como el de la LLP (load loss probability) definida como “la relación entre la energía que no puede suministrar el sistema fotovoltaico y la energía solicitada por la carga durante todo el período de funcionamiento” (Perpiñán, 2020). Sin embargo, para el cálculo de la energía generada por el sistema de captación constituido por 10 paneles fotovoltaicos en la ciudad de Huancaayo, se ha tomado en cuenta un modelo optimizado por D'Angles (2020), quien realizó algunas mejoras al modelo propuesto por una publicación de la Universidad de Cádiz (Jiménez, López & Sales, 2007). El modelo propone el cálculo de la producción de energía mensual del sistema fotovoltaico, teniendo en cuenta la irradiación media mensual por metro cuadrado de superficie ( $G_{dm}(0)$ ), un factor de pérdidas ( $F_p$ ) calculado tomando en cuenta diferentes rendimientos expresados en valores decimales, un factor de corrección por inclinación ( $F_c$ ), la eficiencia del panel fotovoltaico seleccionado ( $\eta_p$ ), el número de días que tiene el mes, el área del panel ( $A_p$ ) y la cantidad total de paneles que conforman el sistema (PanelesPV(TOTAL)).

$$E = G_{dm}(0) \cdot F_c \cdot \eta_p \cdot N^\circ \text{ días} \cdot F_p \cdot A_p \cdot \text{PanelesPV}_{(TOTAL)} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

Fuente: D'Angles (2020).

Para el cálculo del Factor de Pérdidas ( $F_p$ ), se toman en cuenta el rendimiento del inversor ( $\eta_i$ ), el rendimiento de la subestación de potencia ( $\eta_{SET}$ ), el rendimiento del cableado ( $\eta_{NOT}$ ), un factor de pérdidas por acumulación de polvo sobre la superficie del panel ( $F_{su}$ ), un factor de pérdidas por sombras ( $F_s$ ), un factor de pérdidas de potencia por temperatura ( $F_t$ ) y un factor de pérdidas por reflexión ( $F_{ref}$ ).

$$F_p = \eta_i \cdot \eta_{SET} \cdot \eta_{NOT} \cdot F_{su} \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_{ref} \cdot F_{dis} \quad (5)$$

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas por temperatura  $F_t$ , Perpiñán (2018) propone las siguientes expresiones, las cuales se basan en la temperatura de la célula ( $T_c$ ), en grados Celsius, la temperatura ambiente ( $T_a$ ), en grados Celsius; la temperatura nominal de operación de las células (NOCT), en grados Celsius; un valor DT, que expresa una diferencia entre la temperatura de operación de la célula y la temperatura de 25 °C; un coeficiente de pérdidas de potencia por temperatura a potencia máxima ( $C_{tPMAX}$ ); las pérdidas porcentuales de potencia por incremento de temperatura se representan por %PtPMAX; las pérdidas porcentuales de corriente por incremento de temperatura, se representan por %PtIsc y; las pérdidas porcentuales de tensión por incremento de temperatura %PtVoc.

$$T_c = T_a + G \cdot \left( \frac{NOCT-20}{800} \right) \quad (5)$$

$$\Delta T = (T_c - 25) \quad (6)$$

$$\%Pt_{PMAX} = Ct_{PMAX} \cdot (T_c - 25) \quad (7)$$

$$F_t = \frac{(100 - \%Pt_{tem})}{100} \quad (8)$$

$$\%Pt_{Isc} = Ct_{Isc} \cdot (T_c - 25) \quad (9)$$

$$\%Pt_{Voc} = Ct_{Voc} \cdot (T_c - 25) \quad (10)$$

El cálculo de la huella de carbono puede realizarse siguiendo dos criterios establecidos por la *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización* del gobierno Español, que se basan en la norma UNE-ISO 14064-1. De acuerdo con el GHG Protocol se desarrolla en 2006 la norma ISO 14064, los cuales dependerán de si el sistema trabaja conectado a red o en forma aislada, siguiendo los criterios:

**Primer criterio:** Asumiendo que se cuenta con un sistema de generación de energía renovable, el cual está conectado a una red eléctrica de una empresa concesionaria, la cual suministra una energía proveniente de diferentes fuentes, tanto renovables como no renovables, y; por ello, existen unos factores de emisiones característicos de cada empresa. Para el caso de Perú, el factor de emisiones es el propuesto por el Ministerio del Ambiente (MINAM), la cual considera que la huella de carbono es el resultado del producto de la energía anual producida por el sistema, expresada en MWh y un factor de emisión de CO<sub>2</sub> de 0.424 kgCO<sub>2</sub>/kWh. Cabe mencionar que, estos factores están sujetos a estudios y dependen de la variación de la configuración de la matriz energética de cada país.

$$\text{Huella de Carbono}_{(\text{Energía Eléctrica})} = E_{(\text{ANUAL})} \cdot F_{(\text{EMISION})} \quad (11)$$

**Segundo criterio:** Si se asume que el sistema fotovoltaico reemplaza la generación de energía realizada por un sistema térmico propulsado por diesel, lo cual se adaptaría a sistemas que no están conectados a red, el factor de emisiones tomaría un valor de 2.85 kgCO<sub>2</sub>/litro.

### Metodología para las pruebas de hipótesis

Se ha propuesto una hipótesis general de investigación, la cual propone que un ajuste de los modelos de cálculo puede mejorar la estimación de producción de energía del sistema fotovoltaico de 3.25 kWp instalado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la UNCP, en la ciudad de Huancayo. Para ello, la metodología considera el uso de métodos estadísticos con el uso del coeficiente de correlación de Pearson y el uso de la T Student, los que se han desarrollado utilizando Microsoft Excel.

## Resultados

Se han realizado tres simulaciones de cálculo de energía, generada para un sistema fotovoltaico de iguales características técnicas al sistema de 3.25 kW de la UNCP, considerando las irradiancias de las tres fuentes mencionadas en la Tabla 3. Utilizando la ecuación (4), para ello se ha considerado el uso de los factores de pérdidas descritos en la ecuación (5) cuyos factores considerados se muestran a continuación:

**Tabla 6**

*Resultados de cálculos de coeficientes de pérdidas por temperatura (Ft) para Huancayo, expresados en forma porcentual.*

| Mes       | Ct.%Voc | %PtVoc | Ft(Voc) % |
|-----------|---------|--------|-----------|
| Enero     | -0.28   | -1.65  | 98.35     |
| Febrero   | -0.28   | -0.53  | 99.47     |
| Marzo     | -0.28   | -0.82  | 99.18     |
| Abril     | -0.28   | 0.03   | 100.03    |
| Mayo      | -0.28   | -0.01  | 99.99     |
| Junio     | -0.28   | 0.11   | 100.11    |
| Julio     | -0.28   | 0.04   | 100.04    |
| Agosto    | -0.28   | -0.67  | 99.33     |
| Setiembre | -0.28   | -1.10  | 98.90     |
| Octubre   | -0.28   | -1.63  | 98.37     |
| Noviembre | -0.28   | -2.03  | 97.97     |
| Diciembre | -0.28   | -1.27  | 98.73     |

- $\eta_i = 0.97$  Se toma el rendimiento según ficha de fabricante.
- $N_{SET} = 1$  Se asume este valor debido a que, los datos de energía suministrados por el inversor se toman antes del ingreso de la energía a la subestación existente.
- $N_{\Delta T} = 1$  Se asume este valor debido a que, el cableado hasta el inversor es demasiado corto; sin embargo, para evaluar la energía útil del sistema se debería de tomar en consideración en condiciones contrarias.
- $F_{su} = 0.98$  Se toma este valor, ya que la zona en la que se encuentran los paneles es de concreto armado y no está demasiado expuesta al polvo.
- $F_s = 1$  Se toma este valor, por no existir exposición a sobras.
- Para los valores de  $F_t$ , se han calculado los coeficientes que dependen de las temperaturas máximas mensuales de la zona, utilizando las ecuaciones (5) a la (10).
- $F_{ref} = 0.97$  El factor de pérdidas por reflexión
- Para el factor de pérdidas por inclinación ( $F_c$ ), se han asumido los valores calculados por D'Angles (2020), para inclinaciones en sistemas fotovoltaicos de estructura fija en la ciudad de Huancayo con estructuras inclinadas 15° y orientación norte, utilizando el método de Liu y Jordan.

**Tabla 7**

Precipitación acumulada anual para el año 2015 en la ciudad de Huancayo.

| Mes       | FC   |
|-----------|------|
| Enero     | 0.92 |
| Febrero   | 0.96 |
| Marzo     | 1.01 |
| Abril     | 1.07 |
| Mayo      | 1.12 |
| Junio     | 1.15 |
| Julio     | 1.14 |
| Agosto    | 1.09 |
| Setiembre | 1.04 |
| Octubre   | 0.98 |
| Noviembre | 0.94 |
| Diciembre | 0.92 |

Fuente: D'Angles (2020).

**Simulación 1:  
Producción de energía con datos de irradiación proporcionados por Senamhi**

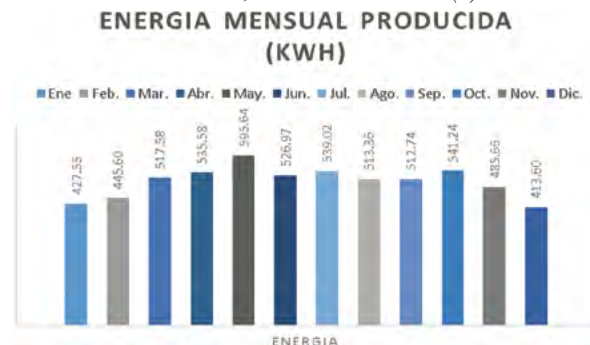
**Tabla 8**

Resultados de producción de energía calculada con valores de irradiación del Senamhi, basados en la ecuación (4).

| Mes  | Nº Dias | Gdm(0) | Fc    | Fp    | Np     | Ap   | Nº Pan | Energía kWh |
|------|---------|--------|-------|-------|--------|------|--------|-------------|
| Ene. | 31      | 5.250  | 0.924 | 0.875 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 427.55      |
| Feb. | 28      | 5.750  | 0.959 | 0.888 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 445.60      |
| Mar. | 31      | 5.750  | 1.010 | 0.885 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 517.58      |
| Abr. | 30      | 5.750  | 1.067 | 0.895 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 535.58      |
| May. | 31      | 5.900  | 1.120 | 0.894 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 595.64      |
| Jun. | 30      | 5.250  | 1.149 | 0.896 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 526.97      |
| Jul. | 31      | 5.250  | 1.138 | 0.895 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 539.02      |
| Ago. | 31      | 5.250  | 1.095 | 0.886 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 513.36      |
| Set. | 30      | 5.750  | 1.037 | 0.881 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 512.74      |
| Oct. | 31      | 6.250  | 0.982 | 0.875 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 541.24      |
| Nov. | 30      | 6.100  | 0.938 | 0.870 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 485.66      |
| Dic. | 31      | 5.100  | 0.915 | 0.879 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 413.60      |

**Figura 6**

Cuadro de resultados de producción de energía calculada con valores de irradiación del Senamhi, basados en la ecuación (4).



De los resultados mostrados se aprecia en la Tabla 9 que los valores de energía producida por el PV UNCP varían en hasta un  $\pm 27.52\%$  con respecto a los valores calculados utilizando el modelo de cálculo de la ecuación (4). Además, los valores acumulados de producción de energía muestran una discrepancia del 9.74%, la cual es mucho mayor que los valores calculados con datos del SENAMHI. Es probable que el error de los datos de SOLAR GIS se deba a que su modelo de cálculo se basa en vistas satelitales y no en recopilación de datos en la superficie terrestre como el de las otras estaciones.

**Tabla 9**

Comparación de producción de energía real con valores calculados, según el modelo de la ecuación (4) con datos de irradiación de Senamhi.

| Mes          | Energía producida (kW-h) | Energía calculada Est. Local (kW-h) | $\Delta$ %  |
|--------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Enero        | 481                      | 427.55                              | -11.11      |
| Febrero      | 378                      | 445.60                              | -17.88      |
| Marzo        | 451                      | 517.58                              | -14.76      |
| Abril        | 487                      | 535.58                              | -9.98       |
| Mayo         | 559                      | 595.64                              | -6.55       |
| Junio        | 554                      | 526.97                              | -4.88       |
| Julio        | 578                      | 539.02                              | -6.74       |
| Agosto       | 573                      | 513.36                              | -10.41      |
| Setiembre    | 526                      | 512.74                              | -2.57       |
| Octubre      | 536                      | 541.24                              | 0.91        |
| Noviembre    | 475                      | 485.66                              | 2.28        |
| Diciembre    | 444                      | 413.60                              | -6.84       |
| <b>Total</b> | <b>6042</b>              | <b>6054.534</b>                     | <b>0.20</b> |

Nota: Comparación de producción de energía real con valores calculados, según el modelo de la ecuación (4) con datos de irradiación de Senamhi.

En la Tabla 10 se puede apreciar el análisis estadístico con la T-Student en la que se comparan los datos de la energía producida por el PV UNCP y la simulación realizada con datos de irradiación del Senamhi.

**Tabla 10**

Análisis estadístico con la T-Student, para energía producida y energía calculada con datos del Senamhi.

|  | Variable 1<br>Energía producida PV UNCP | Variable 2<br>Energía calculada SENAMHI |
|--|---|---|
| Media                                  | 503.536281                              | 504.544501                              |
| Varianza                               | 3751.21921                              | 2785.80544                              |
| Observaciones                          | 12                                      | 12                                      |
| Coefficiente de correlación de Pearson | 0.69327276                              |   |
| Diferencia hipotética de las medias    | 25                                      |   |

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| Grados de libertad             | 11          |
| Estadístico t                  | -1.98755328 |
| P(T<=t) una cola               | 0.03616448  |
| Valor crítico de t (una cola)  | 1.79588482  |
| P(T<=t) dos colas              | 0.07232897  |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.20098516  |

## Simulación 2: Producción de energía con datos de irradiación proporcionados por Solar Gis

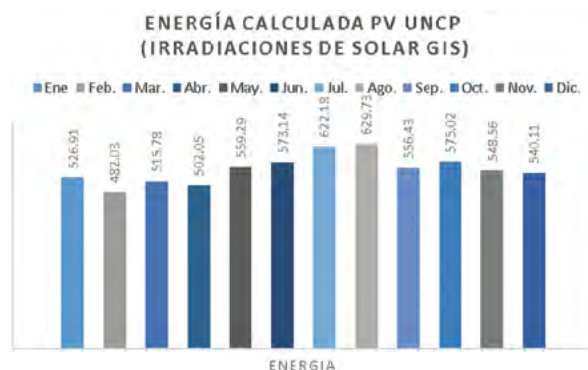
**Tabla 11**

Resultados de producción de energía calculada con valores de irradiación del Solar Gis, basados en la ecuación (4).

| Mes  | Nº Dias | Gdm(0) | Fc    | Fp    | Np     | Ap   | Nº Pan | Energía kWh |
|------|---------|--------|-------|-------|--------|------|--------|-------------|
| Ene. | 31      | 6.470  | 0.924 | 0.875 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 526.91      |
| Feb. | 28      | 6.220  | 0.959 | 0.888 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 482.03      |
| Mar. | 31      | 5.730  | 1.010 | 0.885 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 515.78      |
| Abr. | 30      | 5.390  | 1.067 | 0.895 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 502.05      |
| May. | 31      | 5.540  | 1.120 | 0.894 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 559.29      |
| Jun. | 30      | 5.710  | 1.149 | 0.896 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 573.14      |
| Jul. | 31      | 6.060  | 1.138 | 0.895 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 622.18      |
| Ago. | 31      | 6.440  | 1.095 | 0.886 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 629.73      |
| Set. | 30      | 6.240  | 1.037 | 0.881 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 556.43      |
| Oct. | 31      | 6.640  | 0.982 | 0.875 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 575.02      |
| Nov. | 30      | 6.890  | 0.938 | 0.870 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 548.56      |
| Dic. | 31      | 6.660  | 0.915 | 0.879 | 0.1672 | 1.94 | 10     | 540.11      |

**Figura 7**

Cuadro de resultados de producción de energía calculada con valores de irradiación del Solar Gis de la European Commission, basados en la ecuación (4).



De los resultados mostrados, se aprecia en la Tabla 11 que los valores de energía producida por el PV UNCP varían en hasta un  $\pm 27.52\%$  con respecto a los valores calculados, utilizando el modelo de cálculo de la ecuación (4). Además, los valores acumulados de producción de energía muestran una discrepancia

del 9.74 %, la cual es mucho mayor que los valores calculados con datos del Senamhi. Es probable que, el error de los datos de Solar Gis se deba a que el modelo de cálculo se basa en vistas satelitales y no en recopilación de datos en la superficie terrestre, como el de las otras estaciones.

**Tabla 12**

Producción de energía con datos de SOLARGIS.

| Mes       | Energía producida (kW-h) | Energía calculada Est. Local (kW-h) | $\Delta$ %   |
|-----------|--------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Enero     | 481                      | 466.64                              | -2.98        |
| Febrero   | 378                      | 359.58                              | -4.87        |
| Marzo     | 451                      | 425.76                              | -5.60        |
| Abril     | 487                      | 475.97                              | -2.27        |
| Mayo      | 559                      | 519.92                              | -6.99        |
| Junio     | 554                      | 519.94                              | -6.15        |
| Julio     | 578                      | 558.52                              | -3.37        |
| Agosto    | 573                      | 549.54                              | -4.10        |
| Setiembre | 526                      | 504.71                              | -4.10        |
| Octubre   | 536                      | 514.40                              | -4.10        |
| Noviembre | 475                      | 455.41                              | -4.10        |
| Diciembre | 444                      | 425.76                              | -4.10        |
|           | <b>6042</b>              | <b>5776.16</b>                      | <b>-4.41</b> |

*Nota:* Comparación de producción de energía real con valores calculados, según el modelo de la ecuación (4) con datos de irradiación de Solar Gis.

**Tabla 13**

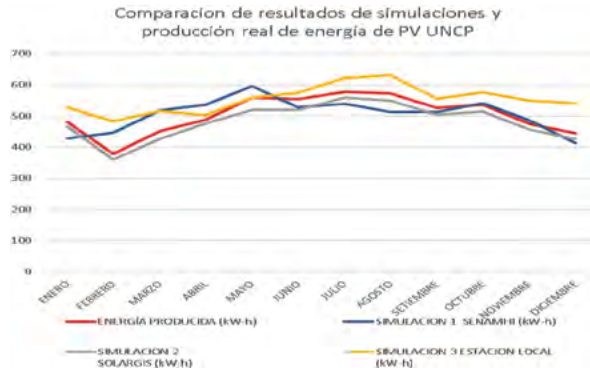
Análisis estadístico con la T-Student, para energía producida y energía calculada con datos de Solar Gis.

|  | Variable 1<br>Energía producida PV UNCP | Variable 2<br>Energía calculada Solar Gis |
|--|---|---|
| Media                                  | 503.536281                              | 481.346726                                |
| Varianza                               | 3751.21921                              | 3376.9416                                 |
| Observaciones                          | 12                                      | 12  |
| Coefficiente de correlación de Pearson | 0.99284454                              |   |
| Diferencia hipotética de las medias    | 0                                       |   |
| Grados de libertad                     | 11                                      |   |
| Estadístico t                          | 9.86058132                              |   |
| P(T<=t) una cola                       | 4.2525E-07                              |   |
| Valor crítico de t (una cola)          | 1.79588482                              |   |
| P(T<=t) dos colas                      | 8.505E-07                               |   |
| Valor crítico de t (dos colas)         | 2.20098516                              |   |



**Figura 8**

Comparación de resultados de simulaciones y producción de energía de PV UNCP.



**Simulación 3:  
Producción de energía con datos de irradiación proporcionados por Estación Local**

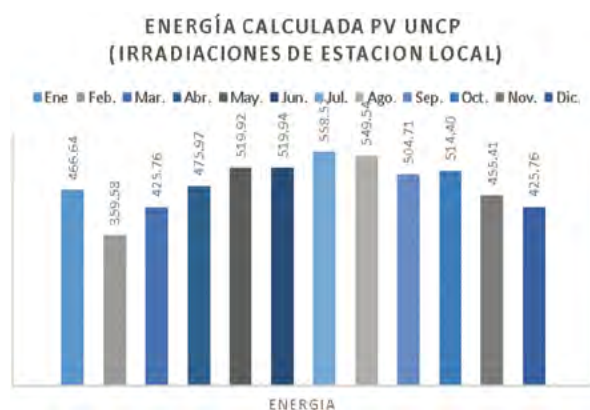
**Tabla 14**

Resultados de producción de energía calculada con valores de irradiación de Estación Local, basados en la ecuación (4).

| Mes  | Nº<br>Días | Gdm(0) | Fc    | Fp    | Np     | Ap   | Nº<br>Pan | Energía<br>kWh |
|------|------------|--------|-------|-------|--------|------|-----------|----------------|
| Ene. | 31         | 5.730  | 0.924 | 0.875 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 466.64         |
| Feb. | 28         | 4.640  | 0.959 | 0.888 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 359.58         |
| Mar. | 31         | 4.730  | 1.010 | 0.885 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 425.76         |
| Abr. | 30         | 5.110  | 1.067 | 0.895 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 475.97         |
| May. | 31         | 5.150  | 1.120 | 0.894 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 519.92         |
| Jun. | 30         | 5.180  | 1.149 | 0.896 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 519.94         |
| Jul. | 31         | 5.440  | 1.138 | 0.895 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 558.52         |
| Ago. | 31         | 5.620  | 1.095 | 0.886 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 549.54         |
| Set. | 30         | 5.660  | 1.037 | 0.881 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 504.71         |
| Oct. | 31         | 5.940  | 0.982 | 0.875 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 514.40         |
| Nov. | 30         | 5.720  | 0.938 | 0.870 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 455.41         |
| Dic. | 31         | 5.250  | 0.915 | 0.879 | 0.1672 | 1.94 | 10        | 425.76         |

**Figura 9**

Cuadro de resultados de producción de energía calculada con valores de irradiación de Estación Local, basados en la ecuación (4).



**Tabla 15**

Producción de energía con datos de Estación Local.

| Mes          | Energía<br>producida<br>(kW-h) | Energía<br>calculada<br>Est. Local<br>(kW-h) | Δ %         |
|--------------|--------------------------------|--|-------------|
| Enero        | 481                            | 526.91                                       | 9.54        |
| Febrero      | 378                            | 482.03                                       | 27.52       |
| Marzo        | 451                            | 515.78                                       | 14.36       |
| Abril        | 487                            | 502.05                                       | 3.09        |
| Mayo         | 559                            | 559.29                                       | 0.05        |
| Junio        | 554                            | 573.14                                       | 3.45        |
| Julio        | 578                            | 622.18                                       | 7.64        |
| Agosto       | 573                            | 629.73                                       | 9.90        |
| Setiembre    | 526                            | 556.43                                       | 5.73        |
| Octubre      | 536                            | 575.02                                       | 7.21        |
| Noviembre    | 475                            | 548.56                                       | 15.52       |
| Diciembre    | 444                            | 540.11                                       | 21.66       |
| <b>Total</b> | <b>6042</b>                    | <b>6631.21</b>                               | <b>9.74</b> |

*Nota:* Comparación de producción de energía real con valores calculados según el modelo de la ecuación (4) con datos de irradiación de Estación Local.

En la Tabla 16, se aprecia el análisis estadístico con la T-Student en la que se comparan los datos de la energía producida por el PV UNCP y la simulación realizada con datos de irradiación de la Estación Local.

**Tabla 16**

Análisis estadístico con la T-Student para energía producida y energía calculada, con datos de la Estación Local.

|  | Variable 1<br>Energía<br>producida<br>(kW-h) | Variable 2<br>Energía<br>calculada<br>Est. Local |
|--|--|--|
| Media                                  | 503.536281                                   | 552.600796                                       |
| Varianza                               | 3751.21921                                   | 1954.35133                                       |
| Observaciones                          | 12   | 12   |
| Coefficiente de correlación de Pearson | 0.86756407                                   |  |
| Diferencia hipotética de las medias    | 0  |  |
| Grados de libertad                     | 11   |  |
| Estadístico t                          | -5.35469298                                  |  |
| P(T<=t) una cola                       | 0.00011607                                   |  |
| Valor crítico de t (una cola)          | 1.79588482                                   |  |
| P(T<=t) dos colas                      | 0.00023214                                   |  |
| Valor crítico de t (dos colas)         | 2.20098516                                   |  |

Los resultados de la prueba de T-Student de la Tabla 16, muestran que las medias guardan una diferencia de 49 kWh en producción de energía; sin embargo, las varianzas de los datos de cada muestra presentan diferencias significativas, las cuales indican una diferencia entre las curvas de producción de energía mostradas en la Figura 8. El coeficiente de correlación de Pearson es de 0.86, lo que hace suponer que existe relación entre los valores reales y los de la simulación, guardando una relación medianamente homogénea. Sin embargo, existe una desviación de un 9.74 % en la energía calculada en la simulación, lo que haría suponer que existe un error mayor del 5 % al utilizar los datos de esta estación meteorológica.

### Estudio correlacional entre la producción de energía del sistema fotovoltaico de 3.25 kW y los factores climatológicos de irradiación, precipitación y temperatura

Se ha tomado una muestra de los registros del inversor para las fechas del 01 al 10 de febrero del año 2020. En la Tabla 17, se muestran la energía diaria producida por el sistema y la irradiación promedio diaria. El resultado muestra un coeficiente de correlación de 0.895 que indica una relación significativa entre la irradiación y la producción de energía del sistema.

**Tabla 17**

*Correlación de valores de energía producida e irradiación diaria.*

| Fecha                 | Energía producida (kW-h) | Irradiación promedio (kW-m2-día) |
|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1/02/2020             | 7.595                    | 0.27                             |
| 2/02/2020             | 16.800                   | 0.48                             |
| 3/02/2020             | 16.765                   | 0.48                             |
| 4/02/2020             | 20.545                   | 0.51                             |
| 5/02/2020             | 19.635                   | 0.66                             |
| 6/02/2020             | 12.635                   | 0.44                             |
| 7/02/2020             | 12.775                   | 0.44                             |
| 8/02/2020             | 12.005                   | 0.35                             |
| 9/02/2020             | 11.235                   | 0.33                             |
| 10/02/2020            | 13.475                   | 0.40                             |
| <b>Coef R Pearson</b> |                          | <b>0.8950</b>                    |

Para el análisis de correlación entre la producción de energía y la precipitación, se han tomado los valores mensuales para cada caso y el resultado muestra un valor de -0.8589, lo que indica que existe una relación inversamente proporcional.

**Tabla 18**

*Correlación de valores de energía producida y precipitación.*

| Fecha                 | Energía producida (kW-h) | Precipitación promedio (mm) |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Enero                 | 481                      | 86.50                       |
| Febrero               | 378                      | 148.00                      |
| Marzo                 | 451                      | 58.42                       |
| Abril                 | 487                      | 58.42                       |
| Mayo                  | 559                      | 11.60                       |
| Junio                 | 554                      | 13.15                       |
| Julio                 | 578                      | 18.67                       |
| Agosto                | 573                      | 7.07                        |
| Setiembre             | 526                      | 8.80                        |
| Octubre               | 536                      | 54.25                       |
| Noviembre             | 475                      | 67.00                       |
| Diciembre             | 444                      | 113.91                      |
| <b>Coef R Pearson</b> |                          | <b>-0.8589</b>              |

Los resultados del análisis correlacional entre la producción de energía y la temperatura promedio muestra un valor de  $R = -0.8039$  lo cual indica una relación significativa de tipo inverso.

**Tabla 19**

*Correlación de valores de energía producida y temperatura.*

| Fecha                 | Energía producida (kW-h) | Temperatura promedio (mm) |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| Enero                 | 481                      | 16.00                     |
| Febrero               | 378                      | 15.74                     |
| Marzo                 | 451                      | 16.01                     |
| Abril                 | 487                      | 14.38                     |
| Mayo                  | 559                      | 14.15                     |
| Junio                 | 554                      | 12.11                     |
| Julio                 | 578                      | 12.00                     |
| Agosto                | 573                      | 12.86                     |
| Setiembre             | 526                      | 14.91                     |
| Octubre               | 536                      | 15.65                     |
| Noviembre             | 475                      | 16.00                     |
| Diciembre             | 444                      | 15.80                     |
| <b>Coef R Pearson</b> |                          | <b>-0.8039</b>            |

### Cálculo de la Huella de Carbono

Se ha calculado las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en función a la generación mensual de energía en kWh producida por el PV UNCP.

**Tabla 15***Producción de energía con datos de Estación Local.*

| Mes          | Energía producida (kW-h) | Factor de emisión CO <sub>2</sub> kgCO <sub>2</sub> /kWh | Reducción de emisiones (kg) |
|--------------|--------------------------|--|-----------------------------|
| Enero        | 481                      | 0.424  | 203.94                      |
| Febrero      | 378                      | 0.424  | 160.27                      |
| Marzo        | 451                      | 0.424  | 191.22                      |
| Abril        | 487                      | 0.424  | 206.49                      |
| Mayo         | 559                      | 0.424  | 237.02                      |
| Junio        | 554                      | 0.424  | 234.90                      |
| Julio        | 578                      | 0.424  | 245.07                      |
| Agosto       | 573                      | 0.424  | 242.96                      |
| Setiembre    | 526                      | 0.424  | 223.14                      |
| Octubre      | 536                      | 0.424  | 227.42                      |
| Noviembre    | 475                      | 0.424  | 201.34                      |
| Diciembre    | 444                      | 0.424  | 188.23                      |
| <b>Total</b> | <b>6042.43</b>           |  | <b>2561.99</b>              |

## Discusión

Los resultados de las pruebas de T-Student de la Tabla 10 en la simulación 1, presentados para la comparación entre los valores de producción de energía del PV UNCP reales y los de la simulación con datos del Senamhi muestran que las medias son casi iguales; sin embargo, las varianzas de los datos de cada muestra presentan diferencias significativas. Así también, el coeficiente de correlación de Pearson indica una relación media entre los datos de las variables 1 y 2, lo que se traduce en el hecho que, aunque las producciones de energía acumuladas sean casi iguales, las producciones de energía mensuales no guardan demasiada relación entre sí.

Los resultados de las pruebas de T-Student de la Tabla 13 en la simulación 2, muestran que las medias guardan una diferencia de 22 kWh en producción de energía, la cual no es muy significativa; así también, las varianzas de los datos de cada muestra presentan valores cercanos, los cuales guardan relación con lo cercanas que son las curvas que las representan, como se puede apreciar en la Figura 8. Del mismo modo, el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.99, lo cual indica una relación significativa entre la producción de energía real y la simulación con los datos de irradiación de Solar Gis. Finalmente, se aprecia que la variación porcentual entre los valores reales totales y los simulados totales solamente tienen una diferencia de - 4.41 %, lo cual está dentro de un margen aceptable inferior al 5 %.

Los resultados de la prueba de T-Student de la Tabla 16 en la simulación 3, muestran que las medias

guardan una diferencia de 49 kWh en producción de energía; sin embargo, las varianzas de los datos de cada muestra presentan diferencias significativas, las cuales indican una diferencia entre las curvas de producción de energía mostradas en la Figura 8. El coeficiente de correlación de Pearson es de 0.86, lo que hace suponer que existe relación entre los valores reales y los de la simulación, guardando una relación medianamente homogénea. Sin embargo, existe una desviación de un 9.74 % en la energía calculada en la simulación, lo que haría suponer que existe un error mayor del 5 % al utilizar los datos de esta estación meteorológica.

Con respecto al análisis de datos de las simulaciones, se puede afirmar que trabajar con los datos del Senamhi inducen a un cálculo global bastante preciso de producción de energía; sin embargo, existen variaciones en las producciones reales de energía, especialmente, en los meses de verano, que es cuando en la sierra central del Perú se presentan altos niveles de irradiación acompañados de abundantes lluvias. Por otro lado, trabajar con datos de Solar Gis ofrece menor variación entre los valores reales y los valores calculados, ofreciendo un nivel aceptable de confiabilidad de resultados. Sin embargo, los cálculos con valores de la Estación Local presentan un mayor error, lo cual podría estar relacionado a una falta de calibración de los equipos.

Con respecto a la huella de carbono, basándose en criterios adoptados por la norma UNE-ISO 14064-1 y de acuerdo con el GHG Protocol consignado en dicha norma, se ha podido cuantificar una reducción de 2.56 toneladas de CO<sub>2</sub> debido a la sustitución de tecnología de generación en un sistema conectado a red. Cabe mencionar que, dicho cálculo depende de los factores de emisiones del sistema eléctrico y que dichos valores deberían de ser proporcionados, en Perú, por el Ministerio del Ambiente.

## Conclusiones

- Las simulaciones con diferentes valores de irradiación suministrados por diferentes fuentes han evidenciado una influencia de la irradiación en la estimación de la producción de energía para sistemas fotovoltaicos ubicados en los Andes centrales del Perú. Así también, se ha demostrado la viabilidad del método de cálculo para sistemas fotovoltaicos propuesto, inicialmente, por la Universidad de Cádiz el cual es analizado y aplicado por la investigación de D'Angles (2020). Por ello, se puede afirmar que el desempeño del sistema fotovoltaico es muy eficiente en comparación a los valores simulados bajo diferentes condiciones.
- El análisis correlacional realizado para determinar la influencia de factores climatológicos,

como la irradiación, la precipitación y la temperatura en el desempeño del sistema fotovoltaico, ha dado valores cercanos a la unidad, con lo cual se puede afirmar que los parámetros climatológicos de la ciudad de Huancayo afectan a la producción de energía del sistema, especialmente durante los meses de lluvias que corresponden al verano austral, meses en los que la producción de energía debería ser máxima, pero debido a las precipitaciones disminuye significativamente.

- Finalmente, se ha podido cuantificar la huella de carbono del sistema fotovoltaico, la cual equivale a 2.56 toneladas de CO<sub>2</sub>, lo cual evidencia una contribución muy favorable de las tecnologías de energías renovables en la región.

### Referencias bibliográficas

- Gow, J. A. & Manning, C. D. (1996). *Development of a model for photovoltaic arrays suitable for use in simulation studies of solar energy conversion systems*. Sixth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives (Conf. Publ. No. 429), 1996, pp. 69-74, doi: 10.1049/cp:19960890.
- Vera Dávila, A. G.; Delgado Ariza, J. C. & Sepúlveda Mora, S. B. (2018). *Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab*. Rev.investig.desarro.innov, 8(2), 343-356.
- Jiménez, L.; López Aguayo, F. & Sales D. (2007). *Manual del máster en Gestión en Energías Renovables*. Tomo VI. Energía solar fotovoltaica. FUECA, Universidad de Cádiz.
- Fiallos, D. & Tipán, L. (2020). *Determinación del punto óptimo de potencia de paneles fotovoltaicos en base a variables difusas mediante el modelo de Liu Jordan*. Universidad Politécnica Salesiana de Quito.
- Ahmadzai, S. & Varshney, L., (2021). *Performance Improvement of Solar PV Under Partial Shading Conditions*. International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), pp. 1-5, doi: 10.1109/CONIT51480.2021.9498408.
- Das, S.; Namrata, K. & Ray, P. (2021). *Dual model representation of solar photovoltaic cell*. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 20210042. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2021-0042>
- D'Angles, B. (2020). *Análisis de los factores que influyen en el diseño de una planta fotovoltaica de 40MW ubicada en el valle del Mantaro* [Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6031>
- Lemes, Francisco R.; Cari, Elmer P.T. & Corrêa, Victor A. (2019). *Parameter Estimation of Photovoltaic System Using Real Condition Data*. IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)
- E.Kumar, Madhav / D. V. Shiva Krishna Rao, K. (2019). *Modelling and Parameter Estimation of Solar Cell using Genetic Algorithm*.
- Diario Gestión. (2016). *MEM lanza proyecto para promover la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero*. Publicación en línea. <https://gestion.pe/economia/mem-lanza-proyecto-promover-reduccion-emisiones-gases-efecto-invernadero-118567-noticia/>
- Vergara Carranza, K.; Piedra Segura, J. & Richmond Navarro, J. F. (2018). *Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos mediante una interfaz gráfica*. Tecnología en Marcha. Vol. 32-3. Julio-Setiembre 2019. Pág. 66-78.