

# CARACTERIZACIÓN TÉRMICA-ENERGÉTICA DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 3,3 KWp INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA: 2015-2019

## THERMAL ENERGY CHARACTERIZATION OF A 3,3 KWp PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTERCONNECTED TO THE ELECTRICAL NETWORK: 2015-2019

Carlos A. Polo Bravo <sup>1\*</sup>, Yosimar Cohaila Mayta <sup>1</sup>, Hugo A. Torres Muro <sup>1</sup>,  
Alessandro De La Gala Contreras <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT), Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

Recibido (Received): 23 / 02 / 2021 Aceptado (Accepted): 22 / 06 / 2021

### RESUMEN

Se presenta los resultados térmicos y energéticos obtenidos bajo monitoreo de un sistema solar fotovoltaico de 3,3 KWp interconectado a la red eléctrica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna (UNJBG), Perú; ubicada a una latitud sur de 17,35°, Longitud 72° O y altura de 525 msnm en el periodo 2015-2019. El sistema genera energía eléctrica a 340 V DC, la cual con un inversor la transforma a 220 VAC, 60 Hz la que se entrega a la red eléctrica de la Ciudad Universitaria.

El sistema fotovoltaico está constituido por doce paneles de 275 Wp y 1,65 m<sup>2</sup> cada uno, orientados al norte con una inclinación sur de 19,5°, azimut cero e instalado bajo una arquitectura que permite monitorear automáticamente y registrar cada 15 segundos la temperatura del panel, ambiente y la irradiancia solar sobre el plano de los paneles, parámetros eléctricos en voltaje continuo (DC) y alterna (AC), durante un año la data disponible es de 365 archivos de 5760 filas x 16 columnas, caracterizados bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Tacna. El sistema está conectado a Internet, de modo tal que se puede monitorear y transferir la data desde cualquier lugar que cuente con el recurso.

Para el periodo enero 2015 a diciembre 2019, ha generado 25670 KWh de energía eléctrica en voltaje alterno a 220 V, 60 Hz de frecuencia, alcanzando su máxima producción energética mensual entre los meses de octubre a marzo de 542, en tanto que entre abril y setiembre disminuye aun valor mínimo de 228 en junio, representando una diferencia del 42,07%; lo que ha significado para la UNJBG un ahorro por el consumo de energía eléctrica de \$ 779 por año. La eficiencia promedio anualizada del sistema es del 13,75%. la temperatura de los módulos en promedio mensual interanual varía entre valores máximos de 42,9 °C y mínimos de 28,6 °C, en tanto que los valores instantáneos máxima superficial del panel de 51,3 °C en enero (verano) y la mínima de 41,8 °C en junio (invierno), para cambios de temperatura ambiental máxima entre de 30,1 y 20,5 °C, respectivamente.

*Palabras Clave: conexión a la red, producción energética, sistema fotovoltaico, temperatura*

### ABSTRACT

The thermal and energetic results obtained under monitoring of a 3,3 KWp photovoltaic solar system interconnected to the electrical grid of the Faculty of Sciences of the Jorge Basadre Grohmann National University of Tacna (UNJBG), Peru are presented; located at a southern latitude of 17,35 °, longitude 72 ° W and height of 525 meters above sea level in the period 2015-2019. The system generates electrical energy at 340 V DC, which with an inverter transforms it to 220 VAC, 60 Hz which is delivered to the electricity grid of the University City.

The photovoltaic system is made up of twelve panels of 275 Wp and 1,65 m<sup>2</sup> each, oriented to the north with a south inclination of 19,5 °, zero azimuth and installed under an architecture that allows the temperature to be automatically monitored and recorded every 15 seconds of the panel, environment and solar irradiance on the plane of the panels, electrical parameters in direct (DC) and alternating (AC) voltage, during one year the data available is 365 files of 5760 rows x 16 columns, characterized under the meteorological conditions of the city of Tacna. The system is connected to the Internet, so that the data can be monitored and transferred from anywhere that has the resource.

For the period January 2015 to December 2019, it has generated 25670 KWh of electric energy in alternating voltage at 220 V, 60 Hz frequency, reaching its maximum energy production months between October to march of 542, while between April and September decreased to a minimum value of 228 in June, representing a difference of 42,07%; which has meant for the UNJBG a savings in electrical energy consumption of \$ 779 per year. The average annualized efficiency of the system is 13,75%.

\* Corresponding author.:

The temperature of the modules in monthly interannual average varies between maximum values of 42,9 °C and minimum of 28,6 °C, while the maximum instantaneous values of the panel surface of 51,3 °C in January (summer) and the minimum of 41,8 °C in June (winter), for maximum environmental temperature changes between 30,1 and 20,5 °C, respectively.

Keywords: grid connection, energy production, photovoltaic system, temperature

## 1. INTRODUCCIÓN

El Protocolo Internacional del Cambio Climático (IPCC) en sus reportes científicos recomienda que para mitigar y adaptarnos al Cambio Climático debemos de usar para cubrir nuestras necesidades energéticas fuentes de energías limpias y renovables como la solar, eólica, biomasa (biocombustibles), la de los océanos, geotérmica y el hidrógeno, que al usarlas no generen gases de efecto invernadero que incrementen los impactos negativos del calentamiento global. La generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos (SFV) es importante, confiable y puede contribuir de manera significativa la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. La Agencia Internacional de Energía (AIE) ha publicado su informe “2014 Snapshot of Global PV Markets”, donde indica que el mercado fotovoltaico mundial ha experimentado un fuerte crecimiento, multiplicándose por un factor de 100 durante el periodo 2000–2014, llegando a 178 GW de capacidad instalada, como consecuencia de las políticas de promoción implementadas por diversos países desarrollados que han impulsado la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución eléctrica (SFVCR) [2]-[4].

En este escenario, en el Perú a noviembre de 2020, la capacidad fotovoltaica instalada a nivel de grandes plantas solares fotovoltaicas interconectados al Sistema Eléctrico de Interconexión Nacional (SEIN) es de 250 MW, como la de Majes Solar 20T de 20 MW y Repartición Solar 20T de 20 MW en Arequipa, Tacna Solar 20TS de 20 MW en Tacna, Panamericana Solar 20TS de 40 MW y Rubí de 150 MW en Moquegua [5].

En la región altoandina de mayor pobreza y asiladas de la red eléctrica convencional de la región Tacna, adicionalmente se tiene instalado más de 3000 paneles fotovoltaicos domiciliarios, en centros educativos, postas médicas, puestos de control, tambos, con potencias entre 50 a 100Wp, bajo un programa regional de electrificación rural aislada de la región Tacna con sistemas fotovoltaicos.

El proyecto “EMERGIENDO CON EL SOL” (PES) se ejecuta bajo convenio institucional entre la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG), la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Universidad de Jaén-España, en esta marco se han instalado el sistema fotovoltaico en la UNJBG-Tacna e

efectos de la evaluación y caracterización del funcionamiento bajo las condiciones meteorológicas del clima desértico del lugar, razón por la cual se presenta los principales resultados del Sistema para el periodo enero 2015 a diciembre 2019.

Todo sistema solar fotovoltaico convierte la energía electromagnética solar en energía eléctrica en voltaje directo, por ello es necesario un inversor DC/AC para convertir la energía eléctrica en voltaje DC a (12-48) V a 220 V AC/60 Hz, la cual se entrega a la red eléctrica para el uso correspondiente [6].

El potencial energético solar de la región Tacna sobre una superficie horizontal, calculada sobre la base de datos de las horas de sol por día (heliofonía) en valores promedios mensuales y anuales registrados por el Senamhi, para el periodo 2006 al 2011, en ocho lugares de registro de la región en el ámbito de sus cuatro provincias, es de (6,04 ± 0,36) kWh/m<sup>2</sup> día [7], observándose que el valor máximo de incidencia de 6,98 ocurre en enero (verano) y la mínima en julio de 4,53 (invierno), dependiendo de las condiciones meteorológicas estacionales (Tabla I y Fig. 1); considerado como uno de los mejores de nuestro país y del mundo, en la que se pueden realizar instalaciones desde pequeños sistemas a grandes centrales fotovoltaicas y de concentración para autoabastecimiento regional, nacional y para la exportación de energía eléctrica a otros países y puede ser fundamental para incrementar la oferta hídrica regional ante el gran problema del déficit de este recurso.

### 1.1 Eficiencia del módulo FV

La eficiencia del módulo FV es definida por la relación entre la energía generada por el dispositivo fotovoltaico en voltaje continuo (VDC) y la irradiancia solar incidente sobre los paneles multiplicada por el área total de los módulos fotovoltaicos (m<sup>2</sup>), que incluye el área de las celdas componentes del panel, espacio intercelular, contactos y marco [8].

### 1.2 Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema, definida por la relación entre la energía transformada en voltaje alterno (VAC) por el inversor y la irradiancia solar incidente multiplicada por el área total de los paneles (m<sup>2</sup>) [9].

TABLA I  
Valores mensuales de la energía solar promedio en KWh/m<sup>2</sup>día anualizada al periodo 2002 al 2011, sobre una superficie horizontal en la región Tacna [7].

| MES                                 | ENE  | FEB  | MAR  | ABR  | MAY  | JUN  | JUL  | AGO  | SET  | OCT  | NOV  | DIC  |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ENERGÍA<br>(KWh/m <sup>2</sup> día) | 6,98 | 6,40 | 6,48 | 5,89 | 5,26 | 4,80 | 4,53 | 5,57 | 6,13 | 6,82 | 6,95 | 6,69 |

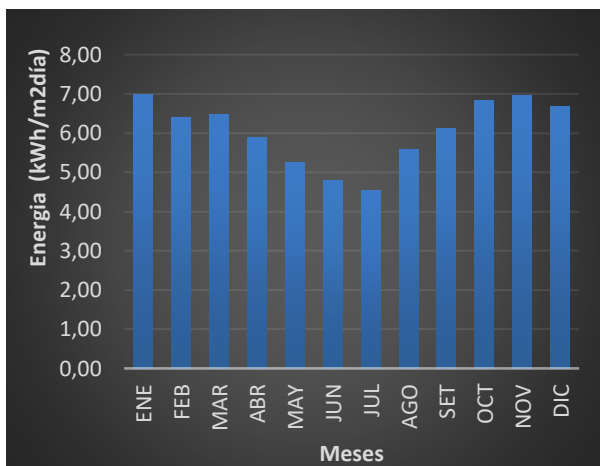


Fig. 1. Potencial energético solar en promedio interanual de la región Tacna, correspondiente al periodo 2002 al 2011, en valores mensuales sobre superficie horizontal [7]

### 1.3 Eficiencia del inversor

La eficiencia del inversor está definida como la relación entre la energía transformada en voltaje alterno (VAC) y la energía recibida desde los paneles fotovoltaicos en voltaje continuo (VDC).

Según Hernández [10], los aspectos fundamentales de calidad de suministro de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica, deben ser evaluados en el punto de conexión son la variación de tensión y frecuencia, huecos de tensión e intervalos de sobretensión, flicker, desequilibrio, distorsión de armónicos, factor de potencia y energía reactiva.

En términos generales, los generadores fotovoltaicos distribuidos conectados a la red pueden aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución, dependiendo de las características y condiciones operativas de red de distribución, así como de la localización de éstos dentro de la misma. Los beneficios potenciales más importantes son la suavización de picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del inmueble o alimentador, alivio térmico a equipos de distribución, disminución de pérdidas por transmisión y distribución, soporte de voltaje en alimentadores de

distribución, y compensación de potencia reactiva en el alimentador [11].

Según Messina [12] bajo una evaluación de dos sistemas FV conectados a la red cada uno de 2,4 kWp instalados en dos lugares con condiciones climáticas diferentes en México, indican que en un período de doce meses, de julio de 2012 a junio de 2013, la instalación de Tepic generó 3888 kWh, mientras que la instalación de Temixco generó 4118 y presentan los parámetros meteorológicos para este período de ambos lugares, el sistema fotovoltaico Temixco-Morelos suministró casi el 90% de la energía eléctrica necesaria para la carga energética de la casa por lo que concluye que el sistema fotovoltaico conectado a la red es factible en vastas áreas de México.

Para tres sistemas fotovoltaicos de 3,3 kWp instalados en Tacna, Arequipa y Lima, Espinoza [13] establece que los resultados del costo nivelado de la electricidad en kWh varían de \$ 0,10 a \$ 0,20, mostrando que solo en la ciudad de Arequipa se logra un resultado competitivo en costos, mientras que en Tacna y Lima depende del mecanismo de financiamiento elegido.

Tinajeros [14], indica que, con un sistema fotovoltaico conectado a red de 3,3 kWp, instalado en la Universidad Nacional de San Agustín, ubicado en latitud 16,2°S, longitud 71,3°O y elevación 2374 msnm, de diciembre 2014 a octubre 2015 la energía total mensual generada fue 1681,1 kWh/kWp, en tanto que la eficiencia diaria media mensual del módulo, inversor y sistema fueron 13,63%, 98,54% y 13,43%, respectivamente.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Equipos y sensores

El SFVCR está instalado en el techo del Centro de Energías Renovables de Tacna de la UNJBG, Tacna; constituido por doce paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino, con una superficie de 19,8 m<sup>2</sup> y capacidad instalada de 3,3 kWp. Los módulos FVs son de la marca Solar World, modelo SW275, cada uno de potencia nominal de 275 Wp, con eficiencia nominal de 16,2% en condiciones estándar

de ensayo. Los módulos están instalados libres de sombra, inclinados  $19,5^\circ$  latitud sur, orientación norte y ángulo azimutal cero. El techo del CERT se encuentra 5 m de altura y la estructura metálica que soporta los módulos está a una altura de 0,2 m respecto del techo.

Utiliza un inversor monofásico marca Steca, modelo Colcept-X 3010X, para transformar la corriente continua (DC) proveniente de los paneles fotovoltaicos en corriente alterna 220 AC, 60 Hz, la cual se inyecta a la red eléctrica de la ciudad universitaria de la UNJBG, con eficiencia nominal de 98,6% y potencia máxima de salida en corriente alterna (CA) de 3000 W (Fig. 2).

La medición de temperatura superficial del módulo FV, se realiza mediante un el sensor Pt 100, con precisión de  $\pm 0,8^\circ\text{C}$ . La temperatura ambiente es medida con un sensor Pt 100, precisión de  $\pm 0,8^\circ\text{C}$ . El Sistema cuenta con sistema de pozo a tierra para la

protección eléctrica correspondiente. Las especificaciones técnicas de los módulos fotovoltaicos e inversor se muestran en la Tabla II.

TABLA II  
Características eléctricas y geométricas de los paneles fotovoltaicos utilizados

| MODULO FOTOVOLTAICO                       | VALOR   | UNIDAD           |
|---|---------|------------------|
| Eficiencia nominal                        | 16,40   | %                |
| Potencia máxima ( $P_{max}$ )             | 275     | Watts            |
| Voltaje de máxima potencia ( $V_{mp}$ )   | 31,0    | Voltios          |
| Corriente de máxima potencia ( $I_{mp}$ ) | 8,94    | Amperios         |
| Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )  | 36,1    | Voltios          |
| Corriente en corto circuito               | 7,75    | Amperios         |
| Tolerancia                                | $\pm 2$ | %                |
| Área de los módulos                       | 19,8    | $\text{m}^2$     |
| Número de módulos                         | 12      | --               |
| TONC                                      | 46      | $^\circ\text{C}$ |

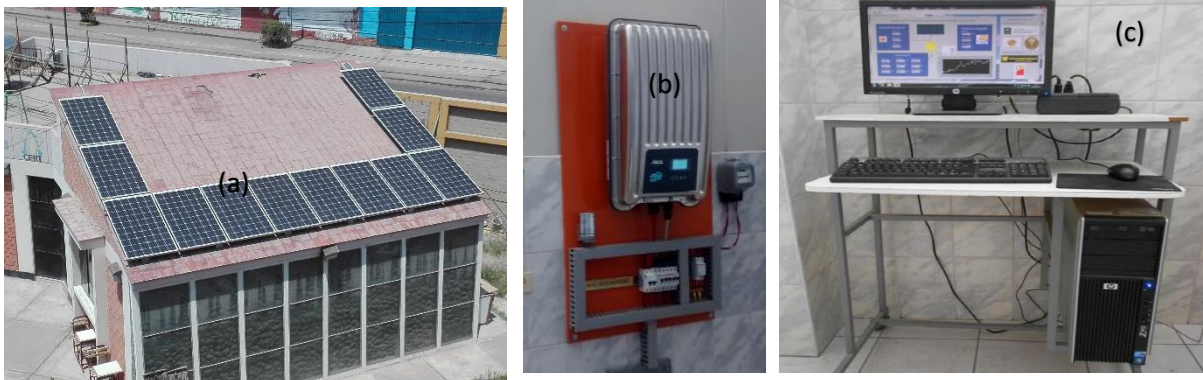


Fig. 2. Vista del Sistema Fotovoltaico conectado a la red eléctrica de la Ciudad Universitaria de la UNJBG, en el techo del CERT (a), inversor inteligente DC/AC (b) e interfaces de sensores y sistema informático de monitoreo de datos (c).

## 2.2 Monitoreo y adquisición de datos

El sistema de control y adquisición de datos del Sistema solar fotovoltaico interconectado a la red eléctrica (SFVCR) está constituido por: 1) módulo Eos-Array, el cual tiene funciones de medida y control divididas en tres módulos: a) VMU-M, módulo maestro y registro de datos, b) VMU-S, unidad de medición de string, mide la intensidad de la corriente continua (CC), voltaje, potencia y energía del sistema fotovoltaico y c) VMU-P, unidad de variables ambientales que mide temperatura del panel fotovoltaicos, temperatura ambiental e irradiancia solar, 2) inversor StecaGrid 3010, que mide y almacena datos del rendimiento energético, 3) contador y analizador de energía, mide la energía activa y reactiva del sistema, 4) convertidores de comunicación y 5) computador para almacenamiento y transferencia de datos [1], [15].

Para recepcionar, las señales de los sensores y de los equipos se utiliza la interface RS485, para la conexión con el computador se usó los convertidores de comunicación SIU-TCP2 (RS485 a TCP/IP) y SIU-PC2 (RS485 a RS232). Los datos son registrados cada

15 segundos, al mismo tiempo que son almacenados y visualizados en tiempo real en el computador, a través de una interface diseñada en LabVIEW. También se realiza el almacenamiento de datos basado en redes de computadoras, a la cual se puede acceder desde cualquier lugar vía la Web de internet (Fig. 3).



Fig. 3. Arquitectura del Sistema de monitorización para el registro, almacenamiento y transferencia de datos del sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica (SFVCR) del CERT.

Los datos registrados, luego son interpolados al programa Excel para ser procesados y obtener resultados cuantificables y gráficos



correspondientes en función del tiempo y entre parámetros del sistema, para el análisis consiguiente.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Temperatura ambiental y de los módulos fotovoltaicos

La variación de la temperatura superficial del panel o módulo fotovoltaico para el periodo específico, para cualquier mes del año siempre es mayor que la temperatura ambiente, en valores promedios mensuales la ambiental varía entre valores máximos de 28,7 °C y mínima de 17,4 °C, en tanto que la temperatura de los módulos entre valores máximos de 42,9 °C y mínimos de 28,6°C; según la Fig. 4, las temperaturas indicadas en valores promedios mensuales e interanuales mantiene una diferencia casi constante de 12 °C, alcanzando valores máximos en la primavera y verano (octubre – marzo) y mínimos en otoño y otoño (abril-setiembre). Este incremento de temperatura influye en los parámetros característicos de los paneles fotovoltaicos, como el voltaje en circuito abierto, corriente en cortocircuito, voltaje y corriente del punto de máxima potencia, el fill factor y la potencia generada.

En la Fig. 5, se muestra la variación de temperatura superficial del módulo y ambiental registrada cada 15 segundos para un día típico del verano tacneño, específicamente para el 20 de febrero de 2017, de mayor irradiancia solar y temperatura ambiente, observamos que la del módulo alcanza casi los 57°C alrededor del mediodía solar, en tanto que por la mañana se incrementa rápidamente superando a la ambiente entre las 08:00 a 10:00 h para mantenerse sobre los 50 °C hasta aproximadamente las 15:00 h para luego decaer rápidamente por debajo de la ambiental alrededor de las 17:00 h, desde esa hora, durante toda la noche y hasta las 07:00 h del día siguiente la temperatura del panel se mantiene por debajo de la ambiental en 2 °C, esto se debe a que el panel está fabricado con elementos metálicos en los marcos y en electrodos para la recolección de la corriente eléctrica fotogenerada. La fluctuación diaria en el panel en esta época varía en el rango de los 20 °C a 56,5 °C, para tal día la temperatura ambiente varía entre los 25 °C y 32 °C. El módulo se calienta en 25 °C más que el ambiente, energía calorífica muy significativa.

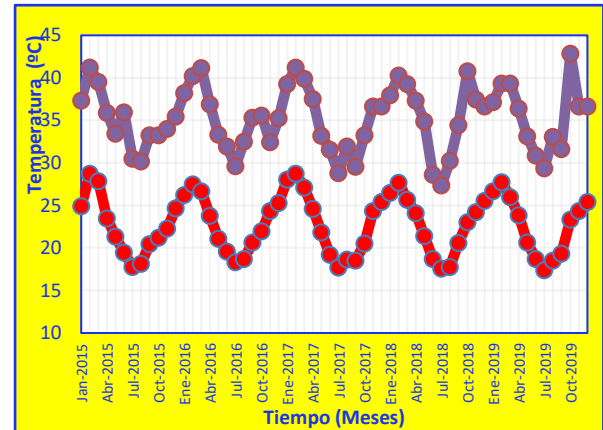


Fig. 4. Variación interanual de la temperatura superficial del módulo fotovoltaico y ambiental, para el periodo enero 2015 – diciembre 2019

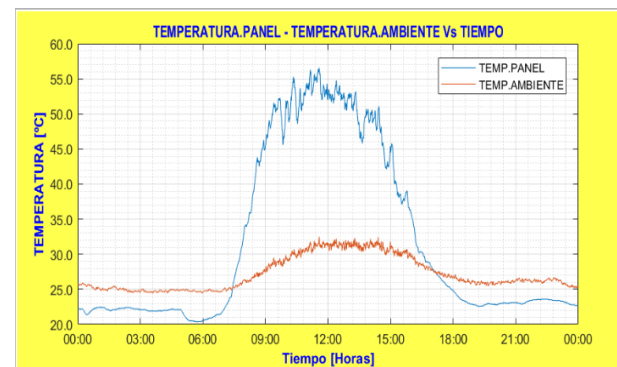


Fig. 5. Variación de la temperatura diaria ambiente y diaria superficial del módulo fotovoltaico para el 20 de febrero 2017, verano.

Igualmente, en la Fig. 6 se muestra la variación diaria de la temperatura superficial del módulo y la ambiental, específicamente para el 24 de junio de 2017 (invierno), mes de menor irradiancia solar incidente sobre la región Tacna y temperatura ambiente, el módulo alcanza temperatura máxima de 42 °C alrededor del mediodía solar en tanto que la ambiental los 18 °C, por lo que el panel se calienta 24 °C más que la temperatura ambiente, durante las horas que no brilla el sol y la noche sucede algo similar que en verano, la temperatura es menor que la ambiental, pero en un mayor rango de diferencia entre 2 °C a 5 °C.

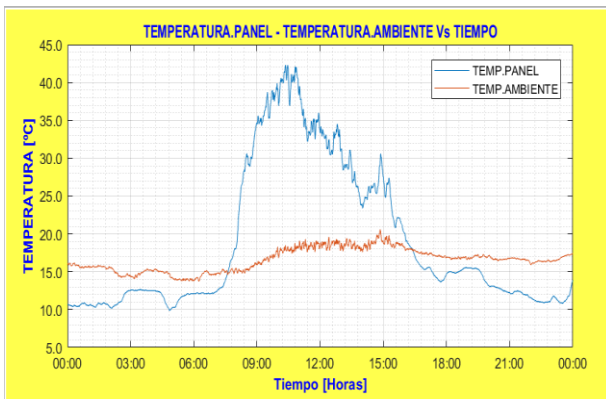


Fig. 6. Variación de la temperatura diaria ambiente y diaria superficial del módulo fotovoltaico para el 20 de junio 2017, invierno.

El incremento de la temperatura del módulo es de 32 °C, entre 10 °C a 42 °C; la temperatura ambiental oscila entre los 14 °C y 20 °C, estos cambios de temperatura influyen en el rendimiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

### 3.2 Potencia generada por el sistema

Para el periodo de evaluación, se muestra la relación de potencias incidente mensual interanual de la irradiancia solar incidente (W) sobre los paneles fotovoltaicos (Fig. 7), observándose que en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y setiembre la potencia promedio disminuye ligeramente desde 2015 al 2019, que afecta a la producción energética del sistema.

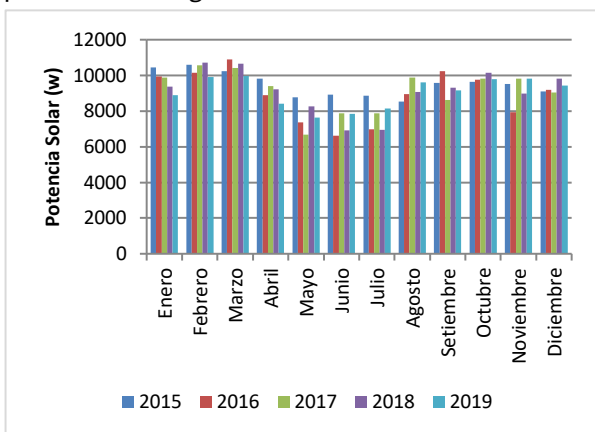


Fig. 7. Variación mensual interanual de la potencia solar en promedio mensual incidente sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos, para el periodo 2015-2019.

En la Fig. 8 se muestra la variación mensual interanual de la potencia DC generada por los módulos fotovoltaicos a 340 V DC, muestra un comportamiento similar al de la irradiancia solar incidente en los meses de enero, febrero, abril, mayo, junio y julio, en los cuales la mayor producción energética acontece en el mes de enero de 2015 y menor para el 2019.

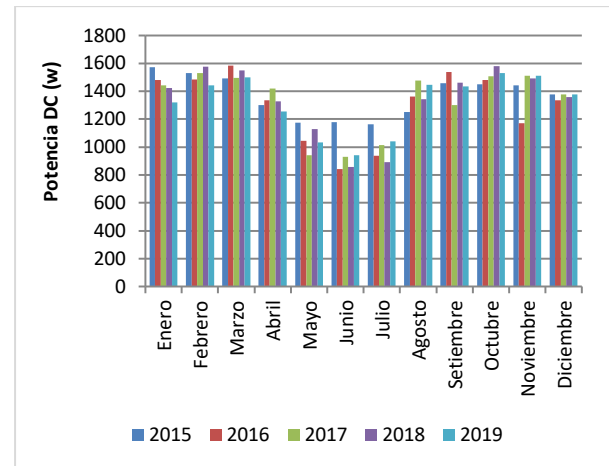


Fig. 8. Variación mensual interanual de la potencia en DC promedio generada por los paneles fotovoltaicos para el periodo 2015-2019.

La gran diferencia entre la potencia incidente sobre los módulos fotovoltaicos y la energía generada se debe a que la eficiencia nominal de los paneles fotovoltaicos es del orden del 16,43 %, el cual se ve disminuida por el incremento de la temperatura de los paneles, a las pérdidas óhmicas en los cables de conexión eléctrica, entre otros.

En la Fig. 9, observamos la variación mensual interanual de la potencia AC entregada por el inversor DC/AC a la red eléctrica a 220 V AC y 60 Hz de frecuencia, denotándose que en los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio de 2015 la potencia entregada es mayor que la del 2019, en similar concordancia con las variaciones de la irradiancia solar incidente sobre los módulos y la potencia DC generada por estos.

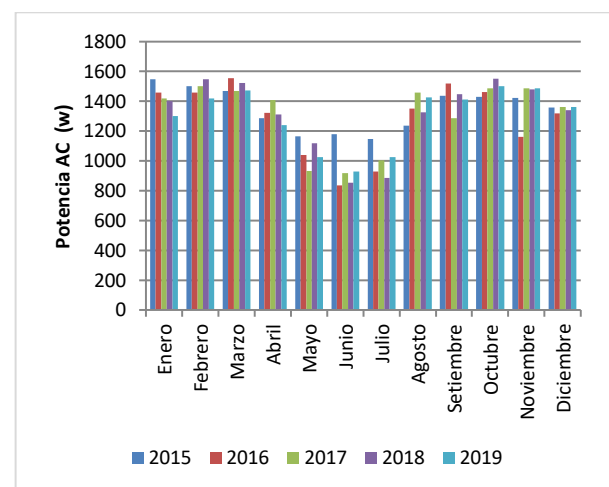


Fig. 9. Variación mensual interanual de la potencia activa AC entregada por inversor a la red eléctrica de la UNJBG, para el periodo 2015-2019.

### 3.3 Eficiencia del inversor DC/AC y del sistema fotovoltaico

Asimismo, se ha evaluado la variación de la eficiencia energética total del sistema fotovoltaico en el periodo indicado, alcanzando valor máximo de 14,74% en octubre de 2017, disminuyendo ligeramente en noviembre y diciembre de 2016, que son los meses de mayor irradiación solar y temperatura ambiente y valores mínimos de 11,45% en junio del 2017, que corresponde al mes de menor irradiación solar incidente y menor temperatura ambiental [2], (Fig. 10).

La eficiencia del inversor a lo largo del año varía entre el 97% y 99 %, manteniéndose casi constante a lo largo de los cinco años de evaluación del sistema, lo que nos indica que el convertidor tiene buena eficiencia de conversión, lo que podemos concluir que la eficiencia del inversor es independiente de los parámetros meteorológicos de la zona y del nivel de irradiación solar global incidente sobre los paneles, durante el día la, temperatura del inversor varía entre 35 a 40 °C.

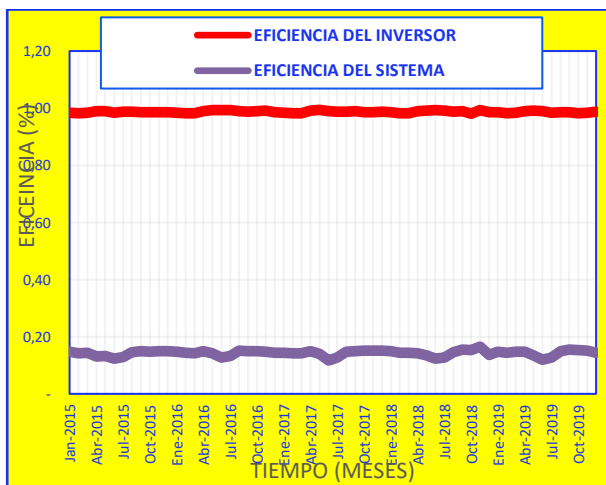


Fig. 10. Variación de la eficiencia del sistema fotovoltaico y del inversor DC/AC para el periodo enero 2015–diciembre 2019.

La eficiencia promedio total del sistema fotovoltaico durante los meses interanuales varía entre el 13 y 15 %, manteniendo este rango durante los cinco años de evaluación, este parámetro es ligeramente menor en los meses finales del otoño, el invierno y entrando a la primavera y ligeramente mayor entre noviembre, todo el verano y entrando al otoño, como consecuencia de la mayor irradiación solar incidente en el verano (Fig. 10).

### 3.4 Energía mensual producida por el sistema fotovoltaico

En la Tabla III, se consignan los valores de la energía mensual producida por el sistema fotovoltaico y la entregada a la red eléctrica de la ciudad universitaria a 220 V AC, 60 Hz de la UNJBG, desde enero 2015 a diciembre de 2019. En la Fig. 11 se muestra la figura correspondiente en la cual se puede visualizar que los meses de mayor producción energética se da en los meses de octubre a marzo (primavera-verano), en enero 542 kWh y marzo 525, el mes de menor producción energética se dio en junio (invierno) con 239, 299, 254, 228 y 261 para el periodo 2015-2019, la producción energética está en función directa con la irradiación solar incidente sobre la ciudad de Tacna.

Algo característico y que se repite para todos los meses, días y años es que la diferencia entre la potencia DC proveniente de los módulos fotovoltaicos y la convertida por el inversor en AC es mínima, lo que nos indica que el inversor es de muy buena eficiencia, alcanzando temperaturas internas que durante los días del año no supera los 40 °C.

Tabla III

Energía mensual producida (KWh) por el sistema fotovoltaico y entregada a la red eléctrica de la ciudad universitaria de la UNJBG, periodo enero 2015 – diciembre 2019, registrada por el inversor Steca DC/AC

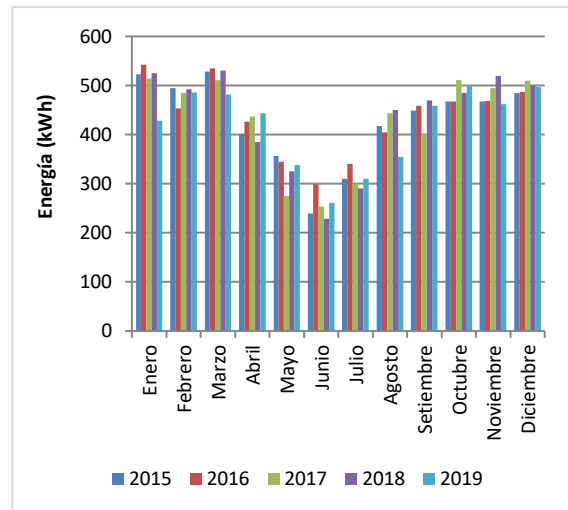
| MES/AÑO | ENERGÍA | MES/AÑO | ENERGÍA | MES/AÑO | ENERGÍA | MES/AÑO | ENERGÍA | MES/AÑO | ENERGÍA |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ENE2015 | 523     | ENE2016 | 542     | ENE2017 | 514     | ENE2018 | 525     | ENE2019 | 428     |
| FEB2015 | 495     | FEB2016 | 453     | FEB2017 | 485     | FEB2018 | 492     | FEB2019 | 486     |
| MAR2015 | 528     | MAR2016 | 535     | MAR2017 | 511     | MAR2018 | 530     | MAR2019 | 482     |
| ABR2015 | 401     | ABR2016 | 426     | ABR2017 | 437     | ABR2018 | 385     | ABR2019 | 444     |
| MAY2015 | 357     | MAY2016 | 345     | MAY2017 | 275     | MAY2018 | 325     | MAY2019 | 338     |
| JUN2015 | 239     | JUN2016 | 299     | JUN2017 | 254     | JUN2018 | 228     | JUN2019 | 261     |
| JUL2015 | 310     | JUL2016 | 340     | JUL2017 | 300     | JUL2018 | 290     | JUL2019 | 310     |
| AGO2015 | 417     | AGO2016 | 405     | AGO2017 | 444     | AGO2018 | 450     | AGO2019 | 355     |
| SET2015 | 449     | SET2016 | 459     | SET2017 | 401     | SET2018 | 470     | SET2019 | 459     |
| OCT2015 | 467     | OCT2016 | 468     | OCT2017 | 511     | OCT2018 | 485     | OCT2019 | 500     |
| NOV2015 | 468     | NOV2016 | 469     | NOV2017 | 495     | NOV2018 | 520     | NOV2019 | 462     |
| DIC2015 | 485     | DIC2016 | 487     | DIC2017 | 510     | DIC2018 | 500     | DIC2019 | 497     |

Nota: Energía eléctrica mensual-interanual producida por el Sistema FV en el periodo 2015-2019

En la Fig. 11 se muestra la figura correspondiente en la cual se puede visualizar que los meses de mayor producción energética en KWh se dio en los meses de octubre a marzo (primavera-verano), en enero 542 y marzo 525, el mes de menor producción energética sucede en junio (invierno) con valores de 239, 299, 254, 228 y 261, la producción energética está en función directa con la irradiancia solar incidente sobre la ciudad de Tacna.

En el periodo indicado de funcionamiento el sistema generó una potencia máxima de 3043 W el 16 de octubre de 2016, la producción energética máxima diaria fue de 21,0 KWh ocurrida el 22 de enero de 2015, desde su instalación en diciembre de 2014 al 31 de diciembre de 2019 el sistema ha funcionado continuamente durante 34102 horas.

Algo característico y que se repite para todos los meses, días y años es que la diferencia entre la potencia DC proveniente de los módulos fotovoltaicos y la convertida por el inversor AC es



mínima, lo que nos indica que el inversor es de muy Fig. 11. Energía mensual producida por el sistema fotovoltaico y entregada a la red eléctrica de la ciudad universitaria de la UNJBG-CERT, para el periodo enero 2015 – diciembre 2019.

TABLA IV

Producción energética en KWh interanual del SFVCR del CERT-UNJBG, ahorro por concepto de consumo, variación promedio de la irradiancia solar incidente y las temperaturas ambiente y superficial del módulo fotovoltaico.

| AÑO  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | TOTAL |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Producción energética</b>                   | 5230  | 5205  | 5149  | 5096  | 4990  | 25670 |
| <b>Ahorro (\$)</b>                             | 762   | 758   | 750   | 743   | 727   | 3741  |
| <b>Irradiancia solar (W/m<sup>2</sup>)</b>     | 503,1 | 465,4 | 478,8 | 476,7 | 472,9 | ---   |
| <b>Temperatura ambiente (°C)</b>               | 22,5  | 22,8  | 22,9  | 22,7  | 22,6  | ---   |
| <b>Temperatura superficial del módulo (°C)</b> | 34,9  | 35,2  | 34,9  | 35,5  | 35,5  | ---   |

Nota: Resumen de principales resultados de la caracterización térmica y energética del sistema FV interconectado a la red eléctrica

buena eficiencia, alcanzando temperaturas internas que durante los días del año no supera los 40 °C.

En la Fig. 12 y Tab. IV, se muestra la producción energética anualizada del sistema para el periodo (2015-2019) totalizando 25670 KWh, observándose que la producción energética promedio interanual es de 5134 con una variación promedio negativa de 72,8 (- 1,42%), la cual puede ser debido a los cambios diarios de las condiciones meteorológicas propias del desierto de la región Tacna; específicamente, la irradiancia solar incidente promedio que en el periodo indicado disminuyó en 6,01%, en tanto que la variación promedio de la temperatura ambiente es mínima entre el rango máximo de (22,9 - 22,5)°C, al igual que la temperatura promedio del panel con variación mínima en el rango (35,5 - 34,9)°C, considero que tales variaciones térmicas influyen, pero no en la magnitud de afectación de la irradiancia solar; además debe de considerarse el polvo del desierto y contaminantes atmosféricos de alta presencia regional, toda vez que del 2017 al 2019 no se ha realizado limpieza superficial de los paneles

fotovoltaicos ni del piranómetro de medición de la irradiancia solar. Igualmente, se muestra la variación interanual promedio de la irradiancia solar incidente sobre el plano de los módulos, y las temperaturas promedio anuales del ambiente y los módulos fotovoltaicos.

Asimismo, mostramos el ahorro anualizado en dólares USA por la UNJBG por el concepto de tarifa eléctrica, en promedio anual es de \$ 748, por lo que considerando el total anualizado de la energía producida es de 25670 KWh y el ahorro de \$ 3741 en los cinco años, resulta un costo promedio de solo generación energética de \$ 0,146 por cada Kilowatts producido por el sistema, con un equivalente a noviembre de 2020 de S/ 0,51, valor por debajo de lo que paga un usuario en el Perú o la región Tacna que consume 90 KWh/mes y paga S/ 48,5 o S/ 0,54/KWh, según lo indicado por Osinergmin (2019).



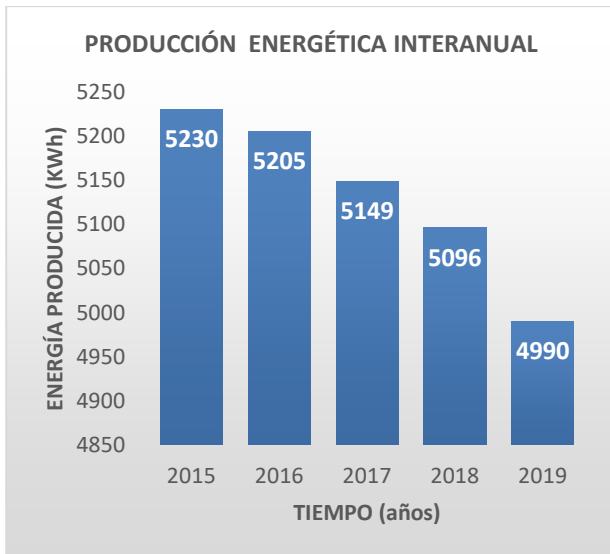


Fig. 12. Producción energética anualizada desde enero 2015 a diciembre 2019 por el sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica de la ciudad universitaria de la UNJBG, Tacna.

## CONCLUSIONES

El SFVCR instalado con una potencia nominal de 3,3 kWp, bajo las condiciones meteorológicas de irradiación solar incidente y temperatura ambiente de la ciudad de Tacna, en el periodo enero 2015 a diciembre 2019 ha generado una energía de 25670 KWh en voltaje alterno a 220 V, 60 Hz de frecuencia, alcanzando su máxima producción energética mensual entre los meses de octubre a marzo igual a 542, en tanto que entre abril y setiembre disminuye, alcanzando un valor mínimo en junio con 228, representando una diferencia del 42,07 %.

La energía generada en promedio interanual es de 5134 KWh o 427 KWh/mes con variación promedio negativa de 72,8 (-1,42 %), debido fundamentalmente a la disminución de la irradiación solar incidente interanual en un 2,23 % y a factores ambientales como el polvo del desierto.

La energía generada mensualmente y anualmente ha permitido que la UNJBG ahorre significadamente por el concepto de consumo de energía eléctrica de la red local, significando a la UNJBG un ahorro monetario de S/ 7797,2 por el pago mensual de energía eléctrica, a un costo de generación de S/ 0,52/KWh por debajo del establecido a nivel país de S/ 0,54/KWh, un indicador muy importante para aplicaciones masivas centralizadas.

La eficiencia nominal de los paneles fotovoltaicos es de 16,42 % a 1000 W/m<sup>2</sup> y 25 °C, la del SFVCR instalado es menor, variando en los meses interanuales en promedios entre 13 y 15 %, determinándose que esta depende básicamente del nivel de irradiación incidente, temperatura ambiente y superficial de los módulos, el polvo y partículas depositadas sobre la superficie de los módulos.

La temperatura superficial que alcanzan los módulos es mayor que la temperatura ambiente, en valores promedios mensuales interanuales varía entre valores máximos de 28,7 °C y mínima de 17,8 °C, en tanto que la temperatura de los módulos en promedio mensual varía entre valores máximos de 42,0 °C y mínimos de 28,6 °C; el rango de variación es del orden de 11 a 12 °C, que influye en la eficiencia de conversión de los módulos, menor a la eficiencia nominal.

El inversor tiene muy buena eficiencia de conversión de la energía a 320 V DC proveniente de los módulos fotovoltaicos a energía AC a 220 V, 60 Hz suministrada a la red eléctrica de la UNJBG.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a la Universidad de Jaén, España en la persona del Dr. Juan De Las Casas y a la Universidad Nacional de Ingeniería, que en el marco del Proyecto “Emergiendo con el Sol” (PES) y el convenio interinstitucional con la UNJBG, que hicieron posible realizar la presente investigación.

## REFERENCIAS

- [1] I. Nawaz, y G. N. Tiwari, “Embodied energy analysis of photovoltaic (PV) system based on macro- and micro-level”, *Energy Policy*, vol. 34, no. 17, pp. 3144–3152, nov. 2006.
- [2] G. Masson, “Global Market Outlook for Solar Power: 2015 – 2019”, *Solar Power Europe*, Belgium, 2015.
- [3] M. Sidrach-de-Cardona y Ll. Mora López, “Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system”, *Energy*, vol. 24, no.2, pp. 93–102, feb. 1999.
- [4] J. P. Vargas, B. Goss, and R. Gottschalg, “Large scale PV systems under non-uniform and fault conditions”, *Sol. Energy*, vol. 116, pp. 303–313, jun. 2015.
- [5] OSINERGMIN. (2019). Información del Proyecto RER. Available: [https://srvgart.osinergmin.gob.pe/sisrer-web/proyectoController/rer\\_subasta](https://srvgart.osinergmin.gob.pe/sisrer-web/proyectoController/rer_subasta)
- [6] M. Cucumo et al., “Performance analysis of a 3 kW grid-connected photovoltaic plant”, *Renew. Energy*, vol. 31, no. 8, pp. 1129–1138, jul. 2006.
- [7] C. Polo, “Potencial energético solar y su impacto ambiental sobre la región Tacna”, Tesis de maestría, Escuela de Posgrado, UNJBG, Tacna, 2013.
- [8] L. Muñoz, *Energía Solar Fotovoltaica*. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 1994.
- [9] E. Lorenzo et al., *Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos*. Ed. Progensa, España, 1994.
- [10] J. C. Hernández y A. Medina, “Conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica: calidad de suministro”, *SUMUNTÁN*, no. 23, pp. 33–44, 2006.
- [11] R. González, “Sistemas fotovoltaicos conectados a la red”, *Boletín IIE*, México, 2003.
- [12] S. Messina et al., “Comparative Study of System Performance of Two 2.4 kW Grid-connected PV Installations in Tepic-Nayarit and Temixco-morelos in México”, *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 161–167, 2014.
- [13] R. Espinoza et al., “Feasibility evaluation of residential photovoltaic self-consumption projects in Peru”, *Renew. Energy*, vol. 136, pp. 414–427, 2019.
- [14] M. Tinajeros et al., “Evaluación del desempeño de un sistema fotovoltaico conectado a red de 3,3 KW en la ciudad de Arequipa”, en XXII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Arequipa, 2015.

C. Polo et al.

[15] E. Kymakis, S. Kalykakis, y T. M. Papazoglou, "Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete", *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 3, pp. 433-438, mar. 2009.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo [revistas@uni.edu.pe](mailto:revistas@uni.edu.pe)