

**Análisis y evaluación de un sistema fotovoltaico de 3.0 KW, conectados a la red del Pabellón
Administrativo de la Universidad Nacional de Juliaca**

**Analysis and evaluation of a 3.0 KW photovoltaic system, connected to the network of the
Administrative Pavilion of the National University of Juliaca**

Junior Torres Yucra
ju.torres@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca
Julissa Condori Ramos
j.condorira@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca
Reynaldo Condori Yucra
rcondori@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca
Wilhem Roger Limachi Viamonte
w.limachi@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca
Edwin René Pari Pari
er.pari@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca
Norman Jesús Beltrán Castañón
nbeltran@unaj.edu.pe – Universidad Nacional de Juliaca

Recibido el 07/06/20 | Aceptado el 26/06/20

Resumen

El presente trabajo es el resultado del primer concurso de investigación en la Universidad Nacional de Juliaca. Se analiza el desempeño de un sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica, el cual está instalado en el pabellón administrativo de la Universidad de Juliaca. El sistema está constituido por doce módulos fotovoltaicos de 250 W_p , sumando los doce módulos tenemos una potencia instalada de 3 kW_p , además esta conectado a un inversor de 3 kW. Para la evaluación de los parámetros de funcionamiento, son considerados los datos de operación referentes al periodo de 27 de marzo de 2019 al 13 de octubre del 2019. Para este periodo, la producción de energía fue de 2999,4 kWh, asimismo los valores de productividad específica (final yield – Y_f) mensual osciló de 139,4 a 167,8 kWh/ kW_p , no considerando los registros durante los meses de marzo y octubre, los cuales no fueron integralmente monitoreados. Otro parámetro utilizado para evaluación del sistema fue la tasa de desempeño (performance ratio – PR), para ello, los valores oscilaron de 79,6% a 82,2 %, con media de 81,2%. El valor de la irradiación media diaria incidente sobre el plano del generador registró en torno de 6,12 kWh/ m^2 , con una productividad diaria media de 4,97 kWh/ kW_p . A través de los datos obtenidos se observa que el sistema tiene un excelente desempeño, lo que demuestra el gran potencial de energía solar que tiene Juliaca para la generación de energía a partir de sistemas fotovoltaicos.

Palabras claves: Sistema fotovoltaico conectado a la red, análisis de desempeño, altitud, productividad diaria.

Abstract

This work is the result of the first research competition at the National University of Juliaca. The performance of a photovoltaic system connected to the electrical grid is analyzed, which is installed in the administrative pavilion of the University of Juliaca. The system is made up of twelve 250 W_p photovoltaic modules, adding the twelve modules we have an installed power of 3 kW_p , it is also connected to a 3kW inverter. For the evaluation of the operating parameters, the operation data referring to the period from March 27, 2019 to October 13, 2019 are considered. For this period, the energy production was 2999.4kWh, also the productivity values. specific (final yield - Y_f) monthly ranged from 139.4 to 167.8 kWh / kW_p , not considering the records during the months of March to October, which were not fully monitored. Another parameter used to evaluate the system was the performance rate (performance ratio - PR), for this, the values ranged from 79.6 to 82.2%, with an average of 81.2%. The value of the average daily irradiation incident on the plane of the generator registered around 6.12 kWh / m², with an average daily productivity of 4.97 kWh / kW_p . Through the obtained data, it is observed that the system has an excellent performance, which shows the great potential of solar energy that Juliaca has for the generation of energy from photovoltaic systems.

Keywords: *Photovoltaic system connected to the network, performance analysis, altitude, daily productivity.*

Introducción

La adopción de sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR) para generación y compensación de energía ya es una realidad en diversos países, de modo que tales sistemas ya alcanzaron una madurez, tales como en países de la Unión Europea y Asia. Otros países están pasando por la etapa de expansión en la capacidad instalada de generación fotovoltaica, como es el caso de Brasil; otros países están en etapa inicial, pero con gran potencial de generación, como es el caso de diversos países de América Latina (REN21,2019).

En el Perú, el decreto legislativo N° 1002 (D.L – 1002), (OSINERG, 2009), de mayo del 2008, corresponde a la Ley de Promoción de Inversión para la generación de electricidad con energía renovable, y el Decreto Supremo N° 012-2011-EM (OSINERG, 2011), de marzo de 2011, que su objetivo era reglamentar la generación de electricidad con energías renovables, fueron fundamentales para el crecimiento de las energías renovables con aplicaciones de sistemas de generación, dentro de ellas la solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica (Yucra, 2019).

De acuerdo con los datos del Ministerio de Energía y Minas, en el 2009, las centrales eléctricas con fuentes provenientes de recursos energéticos renovables poseían 15,6 MW de capacidad instalada, en el 2016 alcanzó a 637,7 MW. La potencia instalada en términos de biomasa era del orden de 23,0 MW en el 2010, y en el 2016 alcanzó 82,5 MW. En el año 2012 la potencia instalada de generación fotovoltaica era de 80 MW, y en el año 2016 alcanzó 96,0 MW. En relación a la generación eólica, en el año 2014 la capacidad instalada de aerogeneradores fue de 142,7 MW y en el año 2016 alcanzó 239,1 MW (MINEM, 2016). Se observa que la evolución en la participación de los recursos de energía renovable en el sistema interconectado nacional de Perú (SEIN) a partir de la promulgación del D.L. 1002, que incentiva la participación e inserción de las energías renovables.

En este contexto, fue instalado en el año 2017 un SFCR, en el pabellón administrativo de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), en la ciudad de Juliaca. El sistema es compuesto por un generador fotovoltaico de 3 kW y un inversor para conexión a la

rede, también de 3 kW. La ciudad de Juliaca, queda localizada en la región andina y está entre las más altas del mundo, presentando perfiles anuales de temperatura e irradiación que favorecen la generación fotovoltaica. Es así, que este trabajo se propone la cuantificación de la energía real producida e inyectada en la red eléctrica de la UNAJ, llevando en consideración datos de medición de las grandezas eléctricas y ambientales.

Gracias a este proyecto, en la Universidad de Juliaca se viene desarrollando otros 06 sistemas fotovoltaicos con fondos de CONCYTEC, los cuales serán instalados en el Instituto de Energías Renovables y Eficiencia Energética, sede de Ayabacas.

Finalmente, el objetivo va a ser la contribución al conocimiento asociado a uso de sistemas fotovoltaicos distribuidos en locales con elevadas altitudes y condiciones climáticas particulares de la región de la sierra.

Descripción del Sistema

Sistema de Generación

El módulo utilizado del generador fotovoltaico, es del modelo Sunmodule Plus SW 250 Poly, del fabricante SOLAR WORLD, el cual posee una potencia nominal de 250 W_p , eficiencia nominal de 14,91 % y es constituido por 60 células de silicio policristalino asociadas en serie. El generador fotovoltaico es formado por la asociación de 12 módulos en serie, totalizando 3 kW_p instalados. La tabla presenta las especificaciones técnicas del módulo de acuerdo con el fabricante.

Tabla 1.
Especificaciones técnicas del módulo Sunmodule Plus SW 250 Poly, de acuerdo con el fabricante

Potencia Máxima (PMP)	250 W_p
Tensión de máxima potencia (VMP)	30,5 V
Tensión de circuito abierto (VOC)	37,6 V
Corriente de máxima potencia (IMP)	8,27 A
Corriente de corto circuito (ISC)	8,81 A
Eficiencia del módulo (η)	14,91%

El sistema está localizado en el pabellón administrativo de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), en la ciudad de Juliaca (Lat: 8° 23' S; Long.: 74° 33' O), se encuentra a 3825 msnm, con

características de tener bajas temperaturas en todo el año. Los módulos están inclinados para el norte, con inclinación de 15°. La figura 01, ilustra el generador fotovoltaico instalado.



Figura 1. Generador fotovoltaico instalado en el pabellón administrativo de la UNAJ.

El inversor utilizado en el sistema, Figura 02, es del modelo STECAGRID 3010x, cuyo fabricante es Steca Elektronik, monofásico, con potencia nominal de 3 kW y tensión nominal de operación de la red de 230 V. La tabla 02 resume algunas especificaciones técnicas del inversor determinadas por el fabricante.



Figura 2. Inversor instalado en el laboratorio de control y automatización en pabellón administrativo de la UNAJ.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del inversor STECAGRID 3010x.

Entrada (c.c.)		Salida (c.a.)	
Potencia máxima	3800 Wp	Potencia	3 kW
Tensión máxima	600 V	Tensión de red	230 V
Tensión de oper.	125-500 V	Corriente máxima	14 A
Corriente máxima	11,5 A	Frecuencia	60 Hz
Número de SPMP	1	Eficiencia max.	96

Sistema de adquisición de datos

La adquisición de datos eléctricos fue hecha utilizando un conjunto de medidores comerciales del fabricante CARLO GAVAZZI, los cuales se conectan tanto a la salida y la entrada del inversor, los cuales toman cuatro valores por minuto de los parámetros monitoreados. Los datos son almacenados en un computador localizado en el laboratorio de control y automatización, el cual se encuentra en el cuarto piso del pabellón administrativo de la UNAJ. Además de eso, los datos son almacenados en un servidor web y mostrados en una interfaz desarrollada en el software LabVIEW para facilitar la visualización. La Figura 03, ilustra de manera simplificada la conexión de los componentes del sistema y la Figura 04, la interfaz desarrollada en LabVIEW.

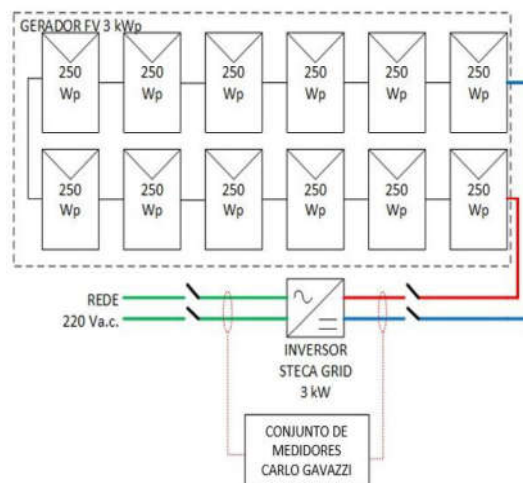


Figura 3. Diagrama esquemático simplificado del sistema

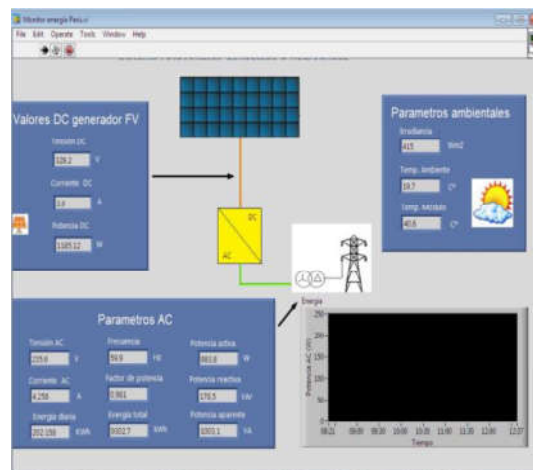


Figura 4. Interfaz desarrollada en LabVIEW, para facilitar la visualización de datos.

Resultados

Análisis operacional del sistema

Presentamos el análisis de los datos operacionales del sistema, llevando en consideración parámetros de desempeño frecuentemente utilizados para evaluar sistemas fotovoltaicos, siendo estos: La energía AC producida, la tasa de desempeño (performance ratio – PR) y la productividad final (Final Yield – Y_f).

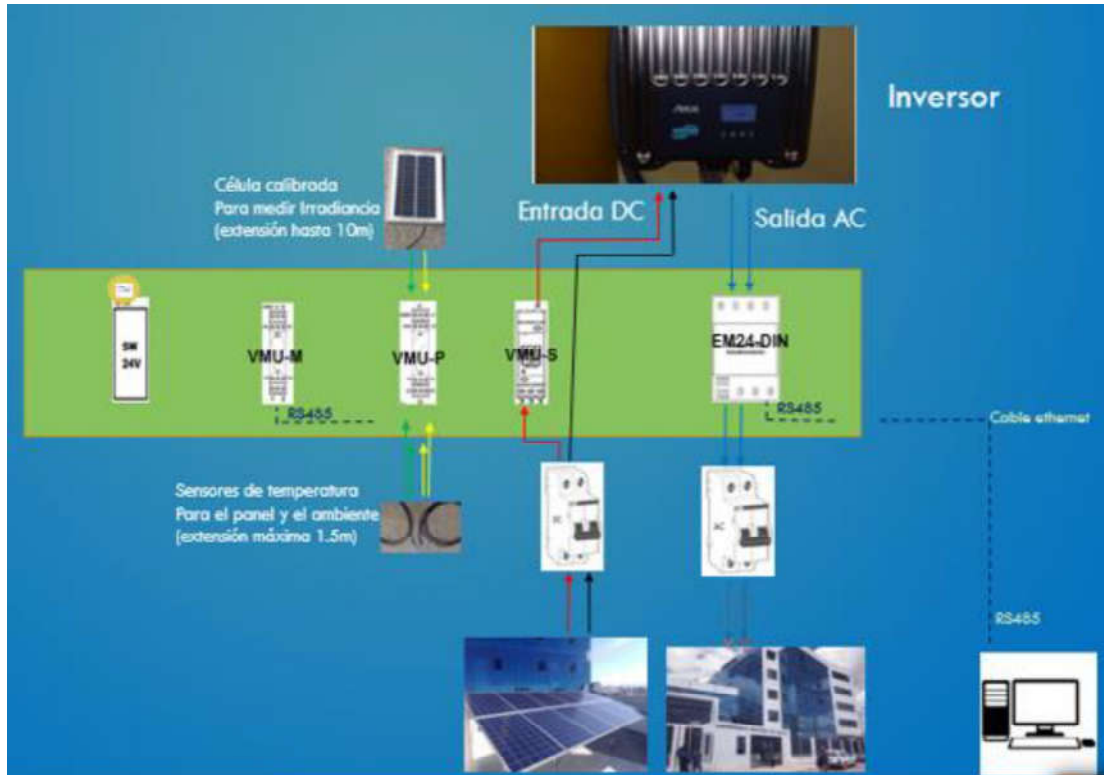


Figura 5. Esquema completo de funcionamiento del sistema fotovoltaico de 3 kW, instalado en la Universidad Nacional de Juliaca

En este trabajo, los datos de hora de sol pleno, HSP, y productividad final fueron calculados para cada día a partir de las mediciones hechas. A partir de los datos diarios de HSP e Y_f , fueron calculados los datos de Performance Ratio diarios, y después fueron hechas las medias aritméticas de los datos de PR y Y_f para cada mes.

Para el cálculo de Y_f , HSP y PR, fueron utilizadas las Eq. (01), Eq. (02) y Eq. (03), respectivamente.

$$Y_f = \frac{E}{P_{PV}^o} \quad (1)$$

Donde Y_f es la productividad del sistema en kWh/KWp, E es la energía producida por el sistema fotovoltaico en kWh durante un cierto intervalo de tiempo, y P_{PV}^o es la potencia nominal del generador fotovoltaico.

$$HSP = \frac{I}{H_{ref}} \quad (2)$$

Donde I es la irradiancia en kWh/m² y H_{ref} es la irradiancia de referencia, a la cual se atribuye el valor de 1000W/m².

$$PR = \frac{Y_f}{HSP} \quad (3)$$

Tal que PR es el Performance Ratio.

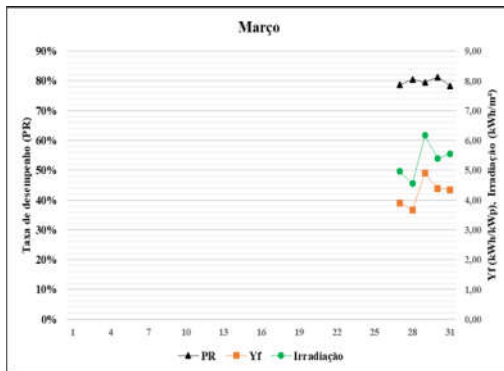
Los datos fueron tomados durante los meses de marzo de 2019 hasta octubre de 2019. Los meses de marzo y octubre, se tuvo problemas de monitoreo, de tal forma que se tiene apenas datos de los días 27 al 31 de marzo y de. 01 a 13 de octubre. La tabla 03, muestra los datos de temperatura ambiente media y la irradiancia total para cada mes, además de los parámetros de desempeño citados anteriormente.

Tabla 3.
Parámetros de desempeño y datos ambientales evaluados desde marzo a octubre del 2019.

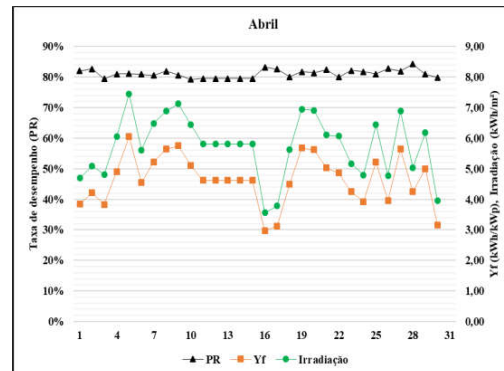
Meses	Energía (kWh)	Yf (kWh/kWp)	PR (%)	Irradiación (kWh/m2)	Ta (°C)
Marzo	63,6	21,2	79,64	26,6	16,13
Abril	418,1	139,4	81,11	172,0	15,99
Mayo	461,4	153,8	81,26	189,3	15,27
Junio	426,9	142,3	81,76	174,1	13,39
Julio	456,5	152,2	82,09	185,3	13,24
Agosto	503,4	167,8	80,59	208,2	14,61
Setiembre	454,7	151,6	80,42	188,7	17,00
Octubre	214,7	71,6	82,20	86,8	17,95

Se observa que el mes con mayor productividad durante el periodo evaluado fue agosto, con 167,8 kWh/kW_p, lo cual equivale a una productividad diaria media de 5,41 kWh/kW_p. Por otro lado, en octubre se monitoreó 13 días, en dicho periodo presentó el mayor valor de productividad diaria media de 5,51 kWh/kW_p. En el mes de agosto se tiene la temperatura ambiente media y la irradiación media diaria más favorables para la producción fotovoltaica, lo cual puede ser contradictorio a un análisis teórico, ya que en octubre tuvo más producción de energía por día. Por lo tanto, es muy importante utilizar los datos de productividad final, de modo que obtenemos un escenario más real del desempeño de un sistema fotovoltaico.

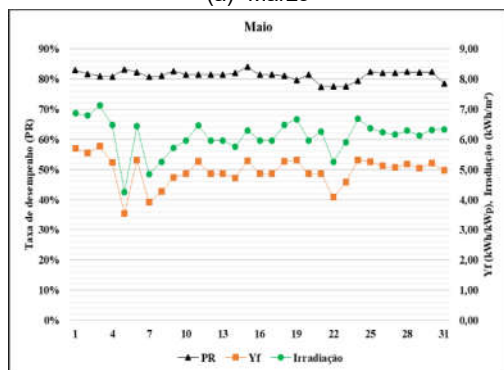
La energía producida durante el periodo evaluado fue de 2999,4 kWh, lo que equivale a una producción de energía diaria media de 14,92 kWh. La productividad diaria media fue de 4,97 kWh/kW_p, y la mensual de 151,2 kWh/kW_p, con excepción de los meses de marzo y octubre. En relación al PR, su valor medio fue de 81,2 % y el mes con mayor tasa de desempeño fue octubre, con 82,20% seguido de julio con 82,09%. La irradiación media diaria en la superficie del generador quedó alrededor de 6,12kWh/m². Los perfiles de irradiación, productividad final y tasa de desempeño diarios de cada mes están ilustrados en la figura 05-a a la figura 05-h.



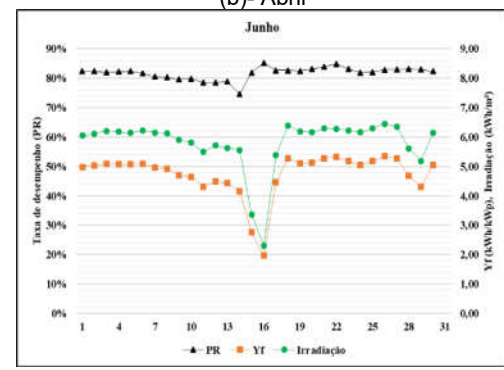
(a)- Marzo



(b)- Abril



(c)- Mayo



(d) - Junio

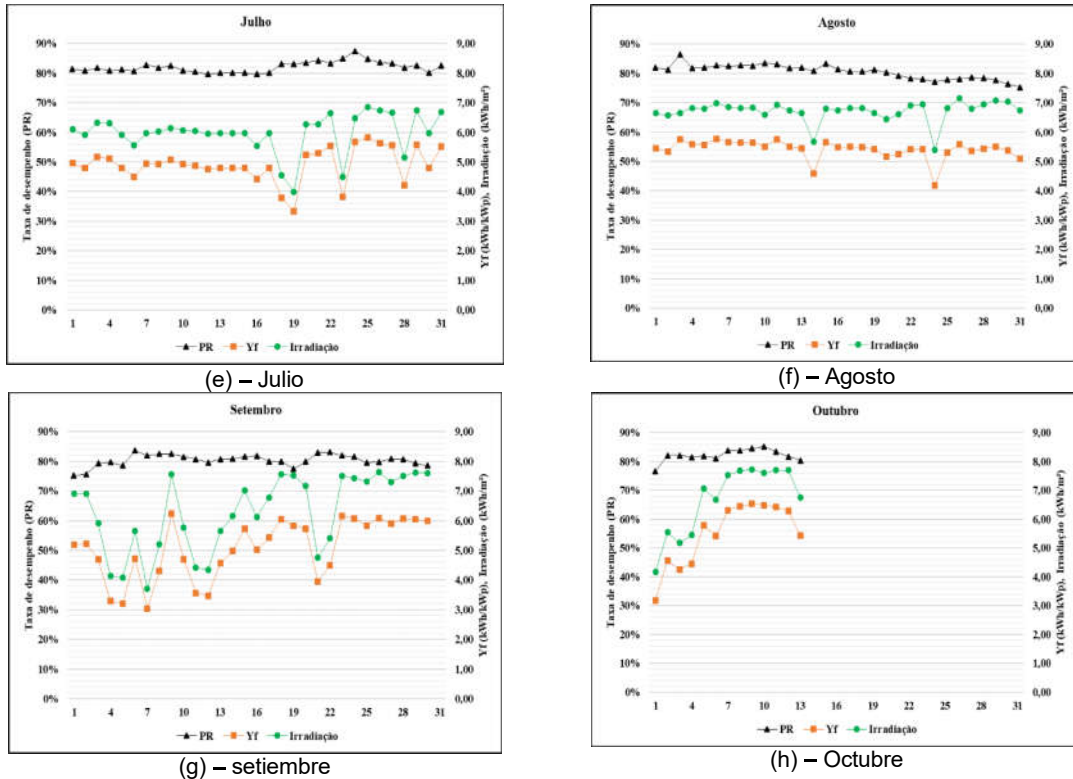


Figura 5. Tasa de desempeño, productividad final e irradiación referentes al periodo de marzo a octubre del 2019.

Los valores mensuales anteriormente mostrados en la tabla 03, son ilustrados gráficamente en la figura 06. La mayor incidencia captada en el generador fotovoltaico ocurrió en el mes de agosto, siendo 208,3 kWh/m², por otro lado, el menor valor registrado fue en abril, donde la irradiación registró 172 kWh/m², se exceptúa para este análisis los meses de marzo y octubre, por fallas técnicas que perjudicaron el monitoreo del sistema fotovoltaico.

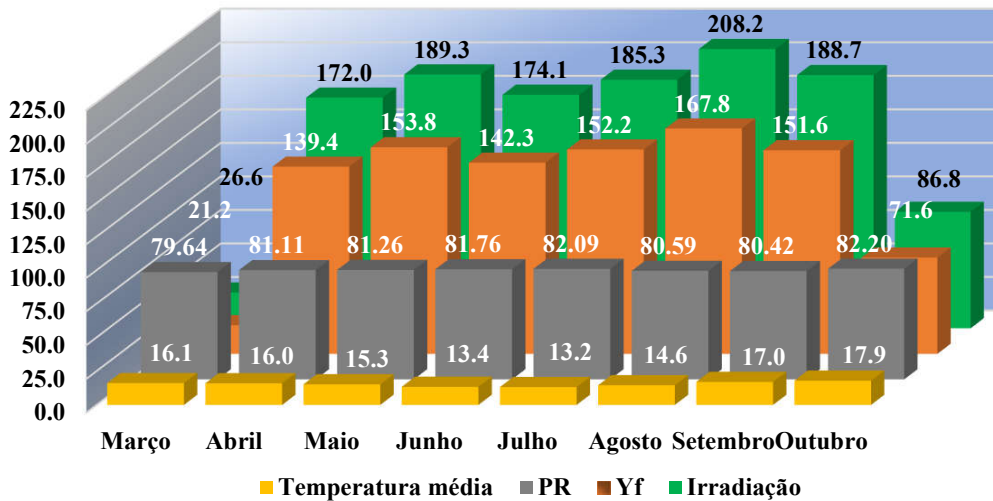


Figura 06. Comparación del desempeño del sistema en diferentes meses, llevando en cuenta Y_f, PR, Irradiación y temperatura ambiente media.

Tabla 1.
Análisis de normalidad según Kolmogorov-Smirnov

		Clima institucional	Desempeño docente
N		177	177
Parámetros normales ^{a,b}	Media	107,5804	95,5352
	Desviación estándar	11,94790	9,69877
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,040	,073
	Positivo	,038	,048
	Negativo	-,040	-,073
Estadístico de prueba		,040	,073
Sig. asintótica (bilateral)		,200 ^{c,d}	,062 ^c

a. La distribución de prueba es normal.
b. Se calcula a partir de datos.
c. Corrección de significación de Lilliefors.
d. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Seguidamente, en la tabla 2 se observan los resultados en cuanto a los niveles de clima institucional que perciben los participantes. Los valores indican una predominancia de un clima a nivel bueno (79 %), seguido de un nivel muy bueno (14%), finalmente, tan solo un 7 % percibe un nivel regular.

Tabla 2.
Nivel de clima institucional desde la percepción de los docentes de la Asociación Educativa Adventista de Puno

Nivel	Frecuencia	Porcentaje
Regular	10	7,0
Buena	113	79,0
Muy buena	20	14,0
Total	143	100,0

Por otra parte, en la tabla 3 se observan también los niveles de desempeño docente según los participantes, en tal sentido, el 54.5 % manifiesta tener un desempeño a un nivel bueno, un 44.3 % un desempeño muy bueno y tan solo el .7 % manifiesta un tener un desempeño regular.

Tabla 3.
Nivel de desempeño docente según docentes de la Asociación Educativa Adventista de Puno

Nivel	Frecuencia	Porcentaje
Regular	1	,7
Buena	78	54,5
Muy buena	63	44,3
Total	143	100,0

Pasando a un plano inferencial, según la tabla 4 se evidencia una correlación directa de magnitud moderada ($r = .414$) entre las variables de estudio, además, un nivel de significancia menor al .05 ($p = .000$), lo cual indica una asociación entre la percepción del clima institucional y el desempeño docente auto percibido en docentes de la Asociación Educativa Adventista de Puno.

Tabla 4.
Análisis de correlación entre las variables de estudio

		Clima institucional	Desempeño docente
Clima institucional	Correlación de Pearson	1	,414**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	143	142
Desempeño docente	Correlación de Pearson	,414**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	142	142

**La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

En la misma línea, también son evidentes las correlaciones entre el desempeño docente y las dimensiones de clima institucional (tabla 5), en este caso, comunicación ($r = .427$), motivación ($r = .335$), confianza ($r = .323$) y participación ($r = .345$); siendo todas, correlaciones significativas ($p < .05$).

Tabla 5.
Análisis de correlación entre la variable desempeño docente y las dimensiones de la variable clima institucional

		Desempeño docente	Comunicación	Motivación	Confianza	Participación
Desempeño docente	Correlación de Pearson	1	,427**	,335**	,323**	,345**
	Sig.		,000	,000	,000	,000
Comunicación	Correlación de Pearson		1	,656**	,542**	,603**
	Sig.			,000	,000	,000
Motivación	Correlación de Pearson			1	,695**	,650**
	Sig.				,000	,000
Confianza	Correlación de Pearson				1	,740**
	Sig.					,000
Participación	Correlación de Pearson					1
	Sig.					

**La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Conclusiones

En el presente trabajo se presentó datos de operación de un sistema fotovoltaico de 3kWp, conectado a la red eléctrica del pabellón administrativo de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), la cual está localizada a 3825 msnm, cuyas características con de poseer bajas temperaturas y altos niveles de irradiancia en todo el año, todo ello pudo comprobarse analizando los datos monitoreados.

Durante el periodo del 27 de marzo hasta el 13 de octubre del 2019, el sistema presentó un excelente desempeño, con una producción de energía diaria media de 14,92 kWh, lo que equivale a una productividad diaria media de 4,97 kWh/kW_p. Se destaca, que el valor mínimo de la productividad mensual fue de 139,4 kWh/kW_p, en el mes de abril, pero el valor máximo fue de 167,8 kWh/kW_p, en el mes de agosto. La irradiancia diaria media en la superficie del generador fotovoltaico fue de 6,12 kWh/m², lo que equivale a 6,12 horas de sol pleno y la tasa de desempeño media fue de 81,2%.

Finalmente, la evaluación técnica operacional del sistema instalado en la Universidad Nacional de Juliaca, demuestra el gran potencial para generación solar fotovoltaica en la ciudad de Juliaca, el monitoreo de variables permitió construir curvas de comportamiento que muestran valores promisoros, lo que definitivamente estimulará y ayudará al desarrollo de futuros sistemas y proyectos que se instale en esta zona del país. Tal es así, que gracias a este proyecto se vienen desarrollando en el Instituto de Energía y Eficiencia Energética de la E.P. de Ingeniería en Energías Renovables 06 sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR), con presupuesto de CONCYTEC : 01 SFCR con inversor tipo CC-CC, 01 SFCR con inversor tipo STRING, 01 SFCR con MICROINVERSORES y 03 SFCR en convenio con la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Referencias bibliográficas

- Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables DECRETO LEGISLATIVO N° 1002. Disponible en: <<http://www2.osinerg.gob.pe/MarcoLegal/docrev/D.%20Leg.%201002-CONCORDADO.pdf>>. Acceso en: 06/12/2019.
- Decreto Supremo N° 012-2011-EM. Disponible en: <<http://www2.osinerg.gob.pe/MarcoLegal/docrev/DS-012-2011-EM-CONCORDADO.pdf>>. Acceso en: 06/12/2019.
- MINEM (2016) Ministerio de Energía y Minas. Anuario Estadístico de Electricidad - Perú
- REN21. RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT. Disponible en: <<https://www.ren21.net/gsr-2019>>. Acceso en: 06/12/2019.
- Yucra, J. T., Ramos, J. C., 2019. Análisis y Evaluación del Sistema Fotovoltaico con Inyección a la Red de 3 kW en Pabellón Administrativo de LA UNAJ, Tesis de pregrado en la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables – Universidad Nacional de Juliaca.

Agradecimientos

A la Vicepresidencia de Investigación de la UNAJ por el soporte financiero. Al Laboratorio de Control de la EPIER-UNAJ por el soporte técnico. A los integrantes del semillero de investigación YLEM por el esfuerzo y dedicación inicial que hicieron que este proyecto sea una realidad.