

AVALIAÇÃO OPERACIONAL PRÉVIA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE INSTALADO A MAIS DE 3800 METROS ACIMA DO NÍVEL DO MAR

Thiago Oliveira Costa (UFPA) - thiagoc.engeletrica@gmail.com

Norman Jesús BELTRAN CASTAÑON (UNAJ - Juliaca) - normanjesus@gmail.com

Junior Torres Yucra (UNAJ) - ju.torres@unaj.edu.pe

Reynaldo CONDORI YUCRA (UNAJ) - rcondori@unaj.edu.pe

Vilma Sarmiento Mamani (UNAJ) - v.sarmiento@unaj.edu.pe

Henry Pizarro Viveros (Instituição - a informar) - h.pizarrov@unaj.edu.pe

Pedro Ferreira Torres (UFPA) - pferreira.t@gmail.com

Wilson Negrão Macêdo (GEDAE-UFPA) - wnmacedo@ufpa.br

Resumo:

Este trabalho analisa o desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFCR) instalado no pavilhão administrativo da Universidad Nacional de Juliaca, cidade Peruana localizada a mais de 3800 m acima do nível do mar. O sistema é composto por doze módulos FV de 250 Wp, portanto possui uma potência instalada de 3 kWp, e está conectado a um inversor de 3 kW. Para a análise, são considerados os dados de operação referentes ao período de 27 de março de 2019 a 13 outubro de 2019. Para este período, a produção de energia foi de 2999,4 kWh, enquanto os valores de produtividade específica (final yield - Yf) mensal oscilaram de 139,4 a 167,8 kWh/kWp, desconsiderando os registros durante os meses de março e outubro, os quais não foram integralmente monitorados. Outro parâmetro utilizado para avaliação do sistema foi a taxa de desempenho (performance ratio - PR), para o qual os valores oscilaram de 79,6 a 82,2%, com média de 81,2%. O valor da irradiação média diária incidente sobre o plano do gerador ficou em torno de 6,12 kWh/m², com uma produtividade diária média de 4,97 kWh/kWp. Através dos dados obtidos percebe-se que o sistema teve um excelente desempenho, o que demonstra o grande potencial da cidade de Juliaca para uso da geração solar fotovoltaica.

Palavras-chave: *Sistema fotovoltaico conectado à rede; Análise de desempenho; Altitude elevada*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

AVALIAÇÃO OPERACIONAL PRÉVIA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE INSTALADO A MAIS DE 3800 METROS ACIMA DO NÍVEL DO MAR

Norman Jesús Beltrán Castañón – normanjesus@gmail.com

Reynaldo Condori Yucra – rcondori@unaj.edu.pe

Junior Torres Yucra – ju.torres@unaj.edu.pe

Vilma Sarmiento Mamani – v.sarmiento@unaj.edu.pe

Henry Pizarro Viveros – h.pizarrov@unaj.edu.pe

Universidad Nacional de Juliaca, Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables, LES

José Manuel Ramos Cutipa – joseramosc@hotmail.com

Universidad Nacional del Altiplano de Puno

Thiago Oliveira Costa – thiagoc.engeletrica@gmail.com

Pedro Ferreira Torres – pedro.ftorres@itec.ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharias Elétrica e Biomédica, GEDAE

4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

Resumo. Este trabalho analisa o desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFCR) instalado no pavilhão administrativo da Universidad Nacional de Juliaca, cidade Peruana localizada a mais de 3800 m acima do nível do mar. O sistema é composto por doze módulos FV de 250 Wp, portanto possui uma potência instalada de 3 kWp, e está conectado a um inversor de 3 kW. Para a análise, são considerados os dados de operação referentes ao período de 27 de março de 2019 a 13 outubro de 2019. Para este período, a produção de energia foi de 2999,4 kWh, enquanto os valores de produtividade específica (final yield - Y_f) mensal oscilaram de 139,4 a 167,8 kWh/kWp, desconsiderando os registros durante os meses de março e outubro, os quais não foram integralmente monitorados. Outro parâmetro utilizado para avaliação do sistema foi a taxa de desempenho (performance ratio - PR), para o qual os valores oscilaram de 79,6 a 82,2%, com média de 81,2%. O valor da irradiação média diária incidente sobre o plano do gerador ficou em torno de 6,12 kWh/m², com uma produtividade diária média de 4,97 kWh/kWp. Através dos dados obtidos percebe-se que o sistema teve um excelente desempenho, o que demonstra o grande potencial da cidade de Juliaca para uso da geração solar fotovoltaica.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico conectado à rede, Análise de desempenho, Altitude elevada.

1. INTRODUÇÃO

A adoção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) para geração e compensação de energia já é realidade em diversos países, de modo que tais sistemas já atingiram elevado estágio de maturidade como em países da União Europeia e Ásia. Outros países estão passando por estágio de plena expansão na capacidade instalada de geração fotovoltaica (FV) como é o caso do Brasil; outros países estão em estágio inicial, mas com grande potencial de geração, como é o caso de diversos países da América Latina (REN21, 2019).

No Peru, o decreto legislativo nº 1002 (D.L.-1002), (OSINERG, 2009), de maio de 2008, corresponde à Lei de promoção de investimentos para geração de eletricidade com energia renovável, e o decreto supremo nº 012-2011-EM (OSINERG, 2011), de março de 2011, que veio a regulamentar a geração de eletricidade com energias renováveis, foram fundamentais para o crescimento do número de aplicações de sistemas de geração com fontes renováveis, dentre elas a solar fotovoltaica conectada à rede (Yucra, 2019).

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia peruano, em 2009, as usinas com fontes provenientes de recursos energéticos renováveis possuíam 15,6 MW de capacidade instalada e, em 2016, atingiram 637,7 MW. A potência instalada em termos de biomassa era da ordem de 23,0 MW em 2010 e em 2016 atingiu 82,5 MW. Em 2012 a potência instalada de geração FV era de 80 MW e em 2016 atingiu a marca de 96,0 MW. Em relação à geração eólica, em 2014, a capacidade instalada de aerogeradores foi de 142,7 MW e em 2016 atingiu 239,1 MW (MINEM, 2016). Percebe-se a evolução na participação dos recursos de energia renovável no sistema interligado nacional do Peru (SEIN) a partir da promulgação do D.L.-1002, que incentiva a participação e inserção de energias renováveis.

Neste contexto, foi instalado em 2017 um SFCR no pavilhão administrativo da Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), na cidade de Juliaca no Peru. O sistema é composto por um gerador FV de 3 kW e um inversor para conexão à rede, também de 3 kW. A cidade de Juliaca fica localizada na região andina e está entre as mais altas do mundo, apresentando perfis anuais de temperatura e irradiação que favorecem a geração FV no local. Com isso, este trabalho se propõe a quantificar a energia real produzida e injetada na rede elétrica da UNAJ, levando em consideração dados de medição de grandezas elétricas e ambientais de interesse. Objetiva-se, portanto, contribuir com a construção de conhecimento associado ao uso de sistemas fotovoltaicos distribuídos em locais com elevadas altitudes e condições

climáticas particulares da região andina. Ressalta-se que, para a análise deste sistema, não foi levada em conta a taxa de degradação do sistema, pois foi instalado há apenas dois anos.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 Sistema de geração

O módulo utilizado para compor o gerador fotovoltaico é do modelo Sunmodule Plus SW 250 Poly do fabricante SOLAR WORLD, o qual possui potência nominal de 250 Wp, eficiência nominal de 14,91% e é constituído de 60 células de silício policristalino associadas em série. O gerador fotovoltaico é formado pela associação de 12 módulos em série, totalizando 3 kWp instalados. A Tab. 1 apresenta as especificações técnicas do módulo de acordo com o fabricante.

Tabela 1 – Especificações técnicas do módulo Sunmodule Plus SW 250 Poly de acordo com o fabricante.

Potência máxima (P_{MP})	250 Wp
Tensão de máxima potência (V_{MP})	30,5 V
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	37,6 V
Corrente de máxima potência (I_{MP})	8,27 A
Corrente de curto-circuito (I_{SC})	8,81 A
Eficiência do módulo (η)	14,91%

O sistema está localizado no pavilhão administrativo da *Universidad Nacional de Juliaca* (UNAJ), na cidade Peruana de Juliaca (Lat.: 8° 23' S; Long.: 74° 33' O), a qual está a 3.825 metros acima do nível do mar e é marcada por baixas temperaturas ao longo do ano. Os módulos estão voltados para o norte, com inclinação de 15°. A Fig. 1 ilustra o gerador fotovoltaico instalado.



Figura 1 – Gerador fotovoltaico instalado no pavilhão administrativo da UNAJ.

O inversor utilizado no sistema, Fig. 2, é do modelo STECAGRID 3010x do fabricante Steca Elektronik, é monofásico, com potência nominal de 3 kW e tensão nominal de operação da rede de 230 V. A Tab. 2 resume algumas especificações técnicas do inversor fornecidas pelo fabricante.



Figura 2 – Inversor instalado no laboratório de controle e automação no pavilhão administrativo da UNAJ.

Tabela 2 – Especificações técnicas do inversor STECAGRID 3010x.

Entrada (c.c.)		Saída (c.a.)	
Potência máxima	3800 Wp	Potência	3 kW
Tensão máxima	600 V	Tensão da rede	230 V
Tensão de operação do SPMP	125-500 V	Corrente máxima	14 A
Corrente máxima	11,5 A	Frequência	50 Hz e 60 Hz
Número de SPMP	1	Eficiência máxima	98%

2.2 Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados elétricos foi feita utilizando um conjunto de medidores comerciais do fabricante CARLO GAVAZZI, os quais se conectam tanto à saída quanto à entrada do inversor e coletam quatro valores por minuto das grandezas monitoradas. Os dados são armazenados em um computador localizado no laboratório de controle e automação, o qual se encontra no quarto piso do pavilhão administrativo da UNAJ. Além disso, os dados são armazenados em um servidor *web* e mostrados em uma interface desenvolvida no *software LabVIEW* para facilitar a visualização. A Fig. 3 ilustra de maneira simplificada a conexão dos componentes do sistema e a Fig. 4, a interface desenvolvida em *LabVIEW*.

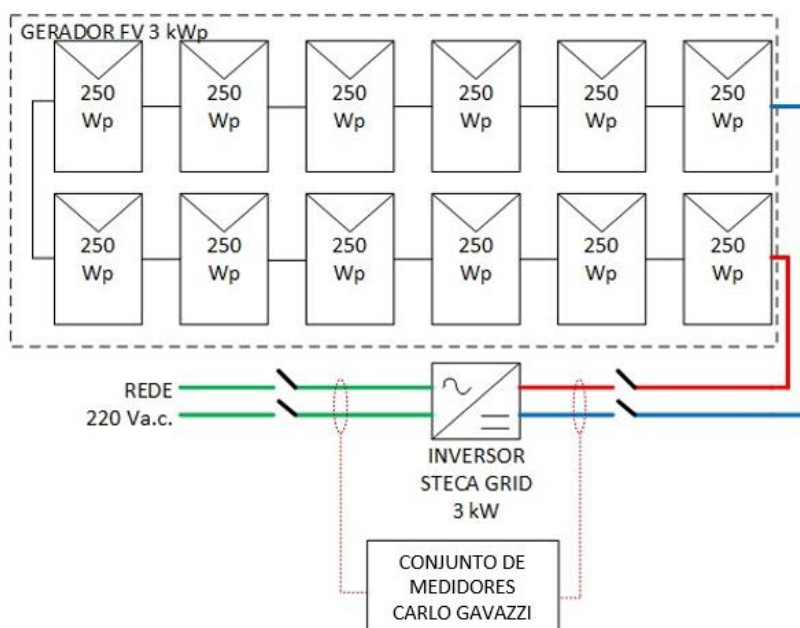


Figura 3 – Diagrama esquemático simplificado do sistema.

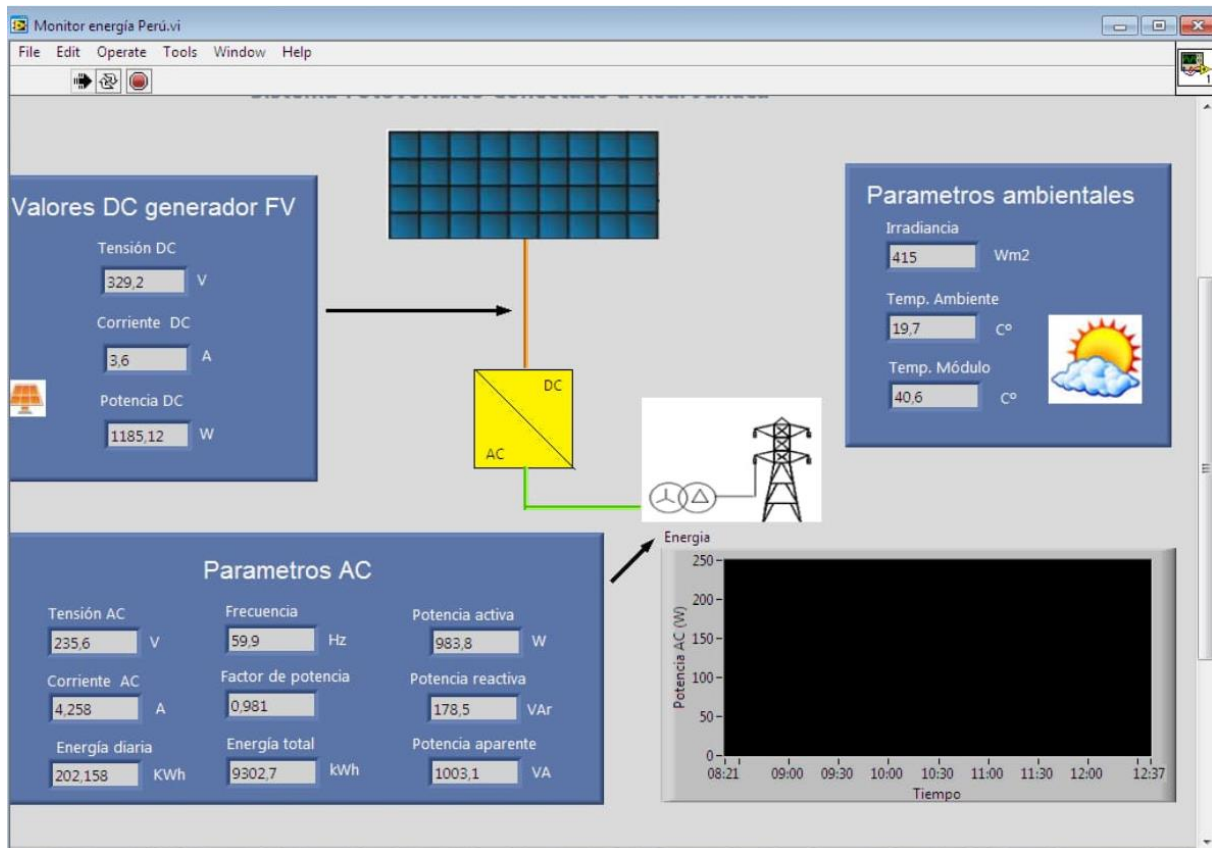


Figura 4 – Interface desenvolvida em *LabVIEW* para facilitar a visualização de dados.

3. ANÁLISE OPERACIONAL DO SISTEMA

Esta seção apresenta a análise dos dados operacionais do sistema descrito anteriormente, levando em consideração parâmetros de desempenho frequentemente utilizados para avaliar sistemas FV, sendo estes: A energia CA produzida, a taxa de desempenho (*performance ratio* – *PR*) e a produtividade final (*Final Yield* – Y_f).

Neste trabalho, os dados de horas de sol pleno, *HSP*, e produtividade final foram calculados para cada dia a partir das medições feitas. A partir dos dados diários de *HSP* e Y_f , foram calculados os dados de *Performance Ratio* diários, e depois foram feitas as médias aritméticas dos dados de *PR* e Y_f para cada mês.

Para o cálculo de Y_f , *HSP* e *PR*, foram utilizadas as Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3), respectivamente.

$$Y_f = \frac{E}{P_{FV}^0} \quad (1)$$

Onde Y_f é a produtividade do sistema em kWh/KWp, E é a energia produzida pelo sistema fotovoltaico em kWh durante um certo intervalo de tempo, e P_{FV}^0 é a potência nominal do gerador fotovoltaico.

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

Onde I é a irradiação em kWh/m² e H_{ref} é a irradiação de referência, à qual atribuiu-se o valor de 1000 W/m².

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

Tal que *PR* é o *Performance Ratio*.

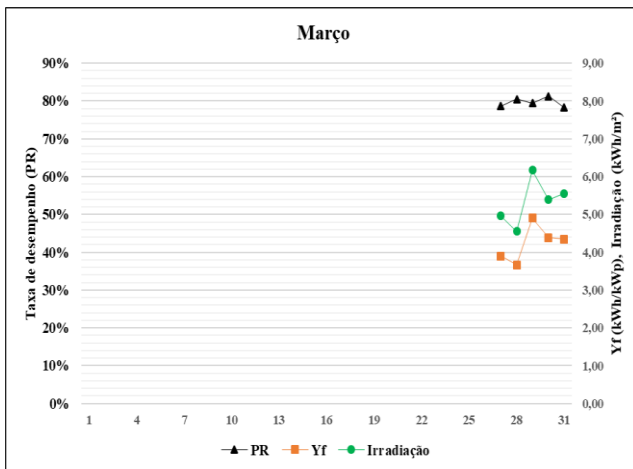
Os dados foram coletados durante os meses de março de 2019 até outubro de 2019. Os meses de março e outubro, porém, não foram integralmente monitorados, de tal forma que se possui dados apenas dos dias 27 a 31 de março e dos dias 01 a 13 de outubro. A Tab. 3 ilustra os dados de temperatura ambiente média e irradiação total para cada mês, além dos parâmetros de desempenho citados anteriormente.

Tabela 3 – Parâmetros de desempenho e dados ambientais avaliados de março até outubro de 2019.

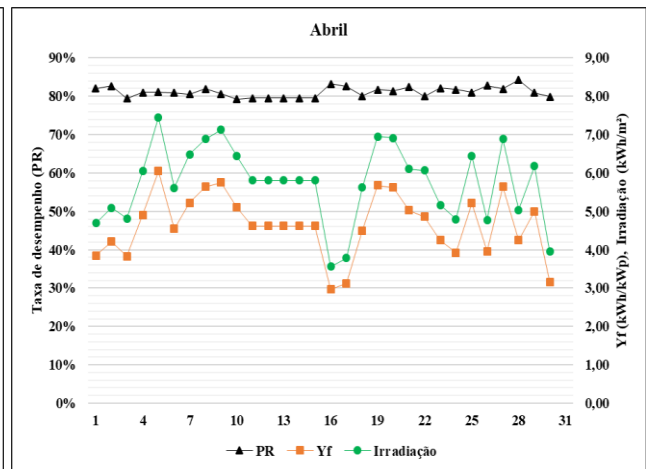
Meses	Energia (kWh)	Y_f (kWh/kWp)	PR (%)	Irradiação (kWh/m ²)	Temperatura ambiente média (°C)
Março	63,6	21,2	79,64	26,6	16,13
Abril	418,1	139,4	81,11	172,0	15,99
Maiο	461,4	153,8	81,26	189,3	15,27
Junho	426,9	142,3	81,76	174,1	13,39
Julho	456,5	152,2	82,09	185,3	13,24
Agosto	503,4	167,8	80,59	208,2	14,61
Setembro	454,7	151,6	80,42	188,7	17,00
Outubro	214,7	71,6	82,20	86,8	17,95

Observa-se que o mês com maior produtividade durante o período avaliado foi agosto, com 167,8 kWh/kWp, o que equivale a uma produtividade diária média de 5,41 kWh/kWp. Por outro lado, outubro, o qual foi monitorado durante 13 dias, apresentou o maior valor de produtividade diária média: 5,51 kWh/kWp. Vale notar que o mês de agosto possui tanto temperatura ambiente média quanto irradiação média diária mais favoráveis à produção fotovoltaica, o que pode ser contraditório em uma análise superficial, visto que outubro produziu mais energia por dia. Com isso, evidencia-se a importância de se utilizar a figura de mérito produtividade final, de modo a se obter o cenário mais realista do desempenho de um sistema FV.

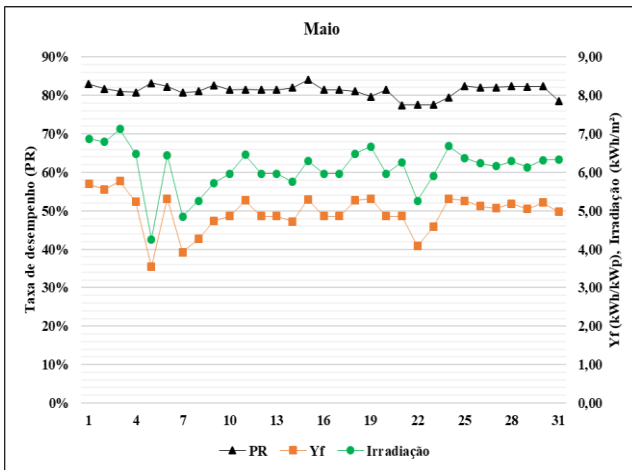
A energia produzida durante o período avaliado foi de 2999,4 kWh, o que equivale a uma produção de energia diária média de 14,92 kWh. A produtividade diária média foi de 4,97 kWh/kWp e a mensal, de 151,2 kWh/kWp, excetuando-se os meses de março e outubro para o cálculo desta última. Em relação ao PR , seu valor médio foi de 81,2% e o mês com maior taxa de desempenho foi outubro, com 82,20%, seguido por julho com 82,09%. A irradiação média diária no plano do gerador ficou em torno de 6,12 kWh/m². Os perfis de irradiação, produtividade final e taxa de desempenho diários de cada mês estão ilustrados da Fig. 5-(a) à Fig. 5-(h).



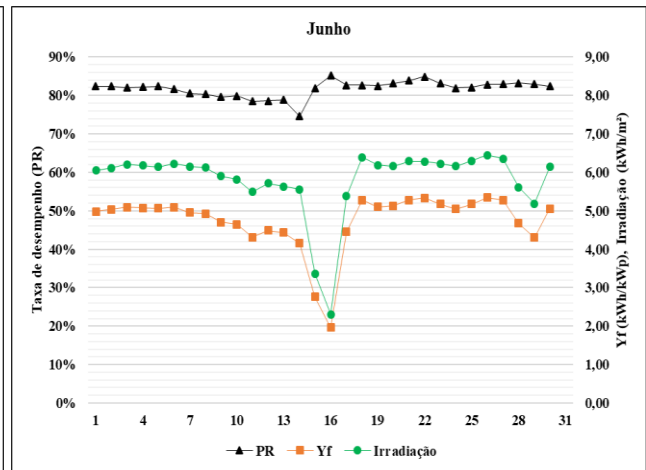
(a) – março



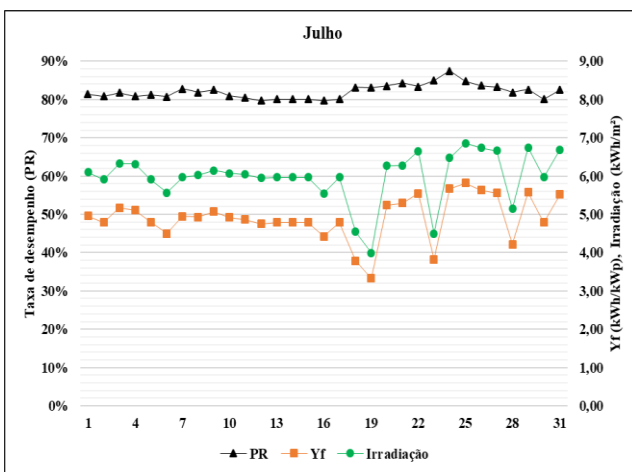
(b) – abril



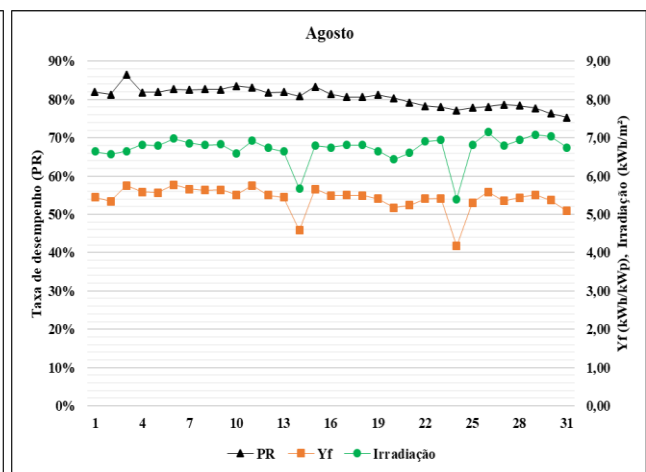
(c) – maio



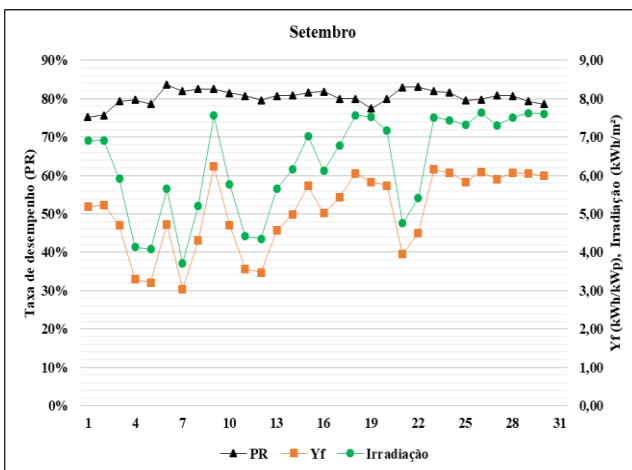
(d) – junho



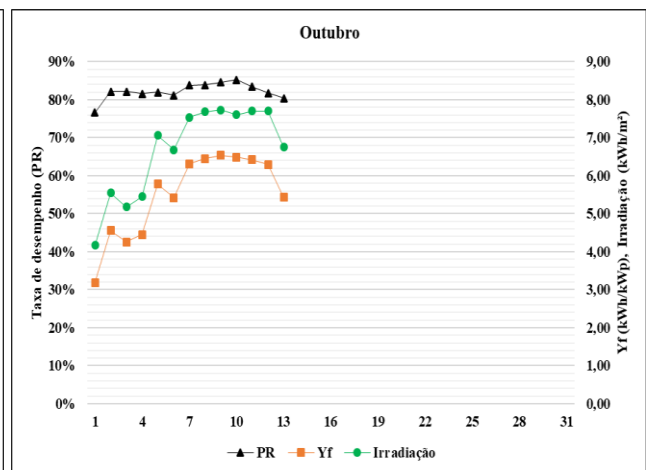
(e) – julho



(f) – agosto



(g) – setembro



(h) – outubro

Figura 5 – Taxa de desempenho, produtividade final e irradiação referentes ao período de março de a outubro de 2019

Os valores mensais mostrados anteriormente na Tab. 3 são ilustrados graficamente na Fig. 6. A maior incidência solar no plano do gerador ocorreu no mês de agosto, sendo 208,2 kWh/m², enquanto que o menor valor registrado foi em abril, onde a irradiação não ultrapassou 172 kWh/m², excetuando-se para esta análise os meses de março e outubro por não terem sido integralmente monitorados.

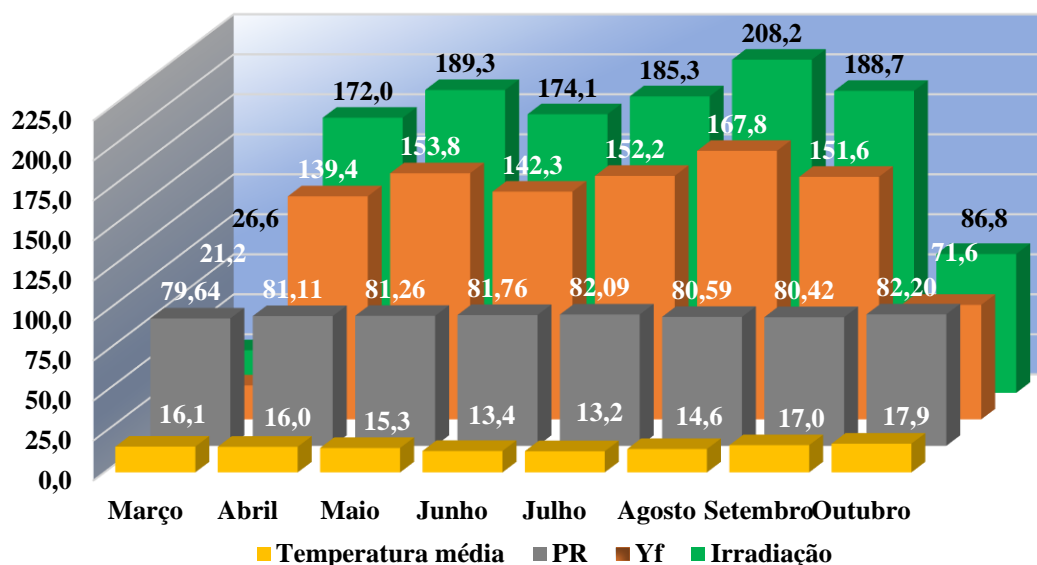


Figura 6 – Comparativo entre o desempenho do sistema em diferentes meses levando em conta Y_f , PR, Irradiação e temperatura ambiente média.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou dados da operação de um sistema fotovoltaico de 3 kWp conectado à rede instalado no pavilhão administrativo da Universidad Nacional de Juliaca, UNAJ, a qual está localizada a 3.825 m acima do nível do mar, e possui baixas temperaturas e altos níveis de irradiação ao longo do ano, conforme comprovado pelos dados medidos.

Durante o período de 27 de março de 2019 até 13 de outubro de 2019, o sistema apresentou excelente desempenho, com uma produção de energia diária média de 14,92 kWh, o que equivale a uma produtividade diária média de 4,97 kWh/kWp. Destaca-se também que o valor mínimo de produtividade mensal foi 139,4 kWh/kWp, no mês de abril, enquanto o valor máximo foi 167,8 kWh/kWp, no mês de agosto. A irradiação diária média no plano do gerador foi de 6,12 kWh/m², o que equivale a 6,12 horas de sol pleno e a taxa de desempenho média foi de 81,2%.

Por fim, a avaliação técnica operacional do sistema instalado em Juliaca demonstra o grande potencial para geração solar fotovoltaica que a cidade apresenta, com figuras de mérito que apresentaram valores promissores, o que pode estimular e auxiliar o desenvolvimento de futuros sistemas que venham a ser instalados no local.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), pelo projeto internacional *emergiendo com el sol* e pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA)

REFERÊNCIAS

Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables
 DECRETO LEGISLATIVO N° 1002. Disponível em:
 <<http://www2.osinerg.gob.pe/MarcoLegal/docrev/D.%20Leg.%201002-CONCORDADO.pdf>>. Acesso em:
 06/12/2019.

DECRETO SUPREMO N° 012-2011-EM. Disponível em: <<http://www2.osinerg.gob.pe/MarcoLegal/docrev/DS-012-2011-EM-CONCORDADO.pdf>>. Acesso em: 06/12/2019.

MINEM. Ministerio de Energia e Minas. Anuario Estadístico de Eletricidad - 2016. Peru, 2016.

REN21. RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT. Disponível em:<<https://www.ren21.net/gsr-2019>>. Acesso em: 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, Trabalho de conclusão de curso, Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables – Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca, Peru.

PRIOR OPERATIONAL EVALUATION OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM INSTALLED OVER MORE THAN 3,800 METERS ABOVE SEA LEVEL

Abstract. *This paper analyzes the performance of a grid-connected photovoltaic system installed in the administrative pavilion of Universidad Nacional de Juliaca, a Peruvian city located over 3800 m above sea level. The system consists of twelve 250 Wp PV modules, so it has 3 kWp installed power, and is connected to a 3 kW inverter. For the analysis, there are considered the operating data from the period of March 27, 2019 to October 13, 2019. For this period, the energy production was 2999.4 kWh, while the monthly final yield values ranged from 139.4 to 167.8 kWh/kWp, disregarding the data from March and October, which were not fully monitored. Another parameter used to evaluate the system was the performance ratio (PR), which values ranged from 79.6 to 82.2%, with an average of 81.2%. The average daily irradiation value on the generator plan was 6.12 kWh/m², with 4.97 kWh/kWp average daily productivity. From the data obtained it can be seen that the system had an excellent performance, which demonstrates the great potential of the city of Juliaca for the use of photovoltaic solar generation.*

Key words: *Grid-connected photovoltaic systems, Performance analysis, High altitude.*