

EVALUATION OF THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF A SOLAR MICROINVERTER IN THE PUNO HIGHLANDS REGION

José Manuel Ramos Cutipa, Magister¹, Leonidas Vilca Callata, Doctor², Rousell Dario Montes Apaza, Magister³, Huber Rony Hurtado Arhuata, Magister⁴

^{1,2}Universidad Nacional del Altiplano, Perú, jramos@unap.edu.pe, lvilca@unap.edu.pe

^{3,4}Universidad Nacional de Juliaca, Perú, rd.montes@unaj.edu.pe, h.hurtado@unaj.edu.pe

Abstract– In photovoltaic systems, irradiation is one of the parameters that directly influences the energy generated. The objective of the study was to use a microinverter with a power of 250 W, which is connected to the conventional electrical energy network. The purpose was to analyze the characteristics and work performance, as well as determine the efficiency that this equipment presents when it operates above 3800 meters above sea level in the Puno highland region, conditions under which this research has been carried out. For this purpose, a system was installed to monitor electrical parameters in direct and alternating current. With this equipment, voltage, current, electrical power and generated energy have been measured. Active and reactive power, energy, voltage, current, frequency and power factor have been measured at the output of the microinverter. The monitoring systems have recorded information daily, with one-minute intervals. From the information collected and analyzed, it has been determined that the efficiency of the microinverter is above 90%. The power factor is the same power capacity which is 250 W.

Keywords– Photovoltaic, operation, Microinverter, efficiency, irradiation.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO OPERACIONAL DE UN MICROINVERSOR SOLAR EN LA REGIÓN ALTIPLANICA PUNO

José Manuel Ramos Cutipa, Magister¹, Leonidas Vilca Callata, Doctor², Rousell Dario Montes Apaza, Magister³, Huber Rony Hurtado Arhuata, Magister⁴

^{1,2}Universidad Nacional del Altiplano, Perú, jramos@unap.edu.pe, lvilca@unap.edu.pe

^{3,4}Universidad Nacional de Juliaca, Perú, rd.montes@unaj.edu.pe, h.hurtado@unaj.edu.pe

Resumen– En los sistemas fotovoltaicos se considera que la irradiación es uno de los parámetros que influye directamente en la energía generada. El objetivo del estudio fue utilizar un microinversor de una potencia de 250 W, el cual está enganchado a la red de energía eléctrica convencional. La finalidad fue analizar las características y desempeño de trabajo, además determinar la eficiencia que presenta este equipo cuando funciona sobre los 3800 msnm en la región altiplánica Puno, condiciones a las cuales se ha realizado la presente investigación. Con este propósito se instaló un sistema para monitoreo de parámetros eléctricos en corriente continua y alterna. Con este equipamiento se ha medido voltaje, corriente, potencia eléctrica y energía generada. En la salida del microinversor se ha medido potencia activa, reactiva, energía, voltaje, corriente, frecuencia y factor de potencia. Los sistemas de monitoreo han registrado información en forma diaria, con intervalos de un minuto. De la información recabada y analizada se ha determinado que la eficiencia del microinversor está por encima del 90%. El factor de potencia se aproxima a la unidad, a partir de que el microinversor funcione con una capacidad mayor del 25%. Durante la prueba, la eficiencia máxima ha estado en el orden del 93,37%. El panel fotovoltaico utilizado tiene una potencia de 270 W, sin embargo, considerando que la potencia del microinversor es de 250 W, este último limita la potencia producida a este valor, por lo que se puede afirmar que en las condiciones de funcionamiento que se tiene en la región Puno, el microinversor y el panel fotovoltaico deberían tener la misma capacidad de potencia la cual es de 250 W.

Palabras clave– Fotovoltaico, operación, Microinversor, eficiencia, irradiación.

I. INTRODUCCIÓN

La Tierra recibe una considerable cantidad de energía del sol, la cual se manifiesta en forma de radiaciones con distintos componentes según su longitud de onda. Nuestro planeta intercepta esta radiación, y para aprovecharla, se utilizan celdas fotovoltaicas, dispositivos capaces de convertir la luz solar en energía eléctrica [1].

Existen varias formas de convertir esta energía, siendo comunes los sistemas fotovoltaicos autónomos que emplean baterías para almacenarla [2], así como los sistemas que la introducen directamente en la red eléctrica[3]. Estos últimos pueden instalarse para generar cantidades de energía eléctrica en el rango de los megavatios, siendo conocidos como centrales solares fotovoltaicas, también existen aplicaciones

pequeñas en donde se pueden utilizar inversores y microinversores [4].

La utilización de microinversores permite que los paneles solares operen a su capacidad máxima sin verse afectados por fenómenos de acoplamiento entre ellos, lo que conlleva a una notable reducción en las pérdidas fotovoltaicas [5]. Este enfoque incrementa la producción de energía, al aprovechar la radiación solar concentrada, la cual puede ser generada por reflejos de radiación en el entorno edificado, ya sea a través de materiales de construcción o mediante elementos diseñados específicamente para potenciar este fenómeno[6]. En Sosa et al. [7], se destaca la necesidad de diseñar e implementar sistemas que puedan conectarse a la red eléctrica para transferir energía proveniente de fuentes renovables y suministrar energía directamente a las cargas. En [8], se considera la variabilidad natural de la energía solar fotovoltaica y examina un sistema que proporciona electricidad adicional cuando la generación solar excede la demanda, y puede recurrir a la red eléctrica pública cuando la generación solar es insuficiente. También en [9], se propone un diseño clásico de microinversor que puede conectarse a la red eléctrica y controlar la magnitud y fase de la energía generada por uno o varios paneles solares, utilizando un algoritmo de seguimiento de máxima potencia (MPPT) único para todo el conjunto de celdas fotovoltaicas. Sin embargo, desde un punto de vista técnico, es necesario investigar el rendimiento de los microinversores en regiones de gran altitud, como la región de Puno, que experimentan condiciones climáticas distintas debido a su ubicación geográfica única.

La utilización de paneles fotovoltaicos o células solares en la generación de energía eléctrica es fundamental debido a su versatilidad y a la notable mejora en la eficiencia de estos sistemas [10]. El objetivo principal de la investigación fue evaluar el rendimiento operativo de un microinversor solar fotovoltaico conectado a la red, operando a una altitud superior a los 3800 metros sobre el nivel del mar.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Laboratorio de Control y Procesos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica (EPIME) en la Universidad Nacional del Altiplano (UNA), donde se implementó un sistema fotovoltaico

conectado a la red utilizando un microinversor, el esquema utilizado se puede ver en la Figura 1.

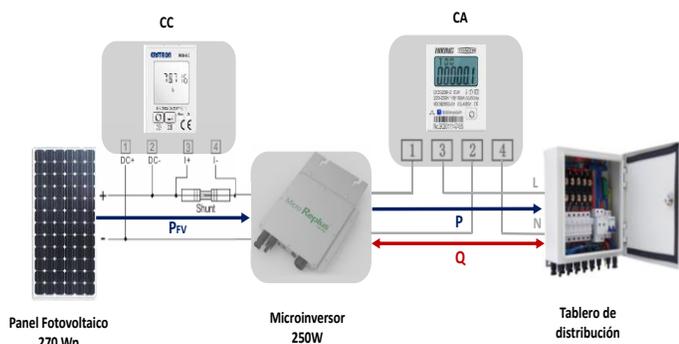


Figura 1. Esquema de instalación del equipamiento

La población objeto de estudio fue definida por la información obtenida a través del sistema de monitoreo. Para la investigación, se seleccionó una muestra de datos recopilados durante el periodo de diciembre del año 2023, considerando el día 18 como representativo, dado que ese día se presentaron

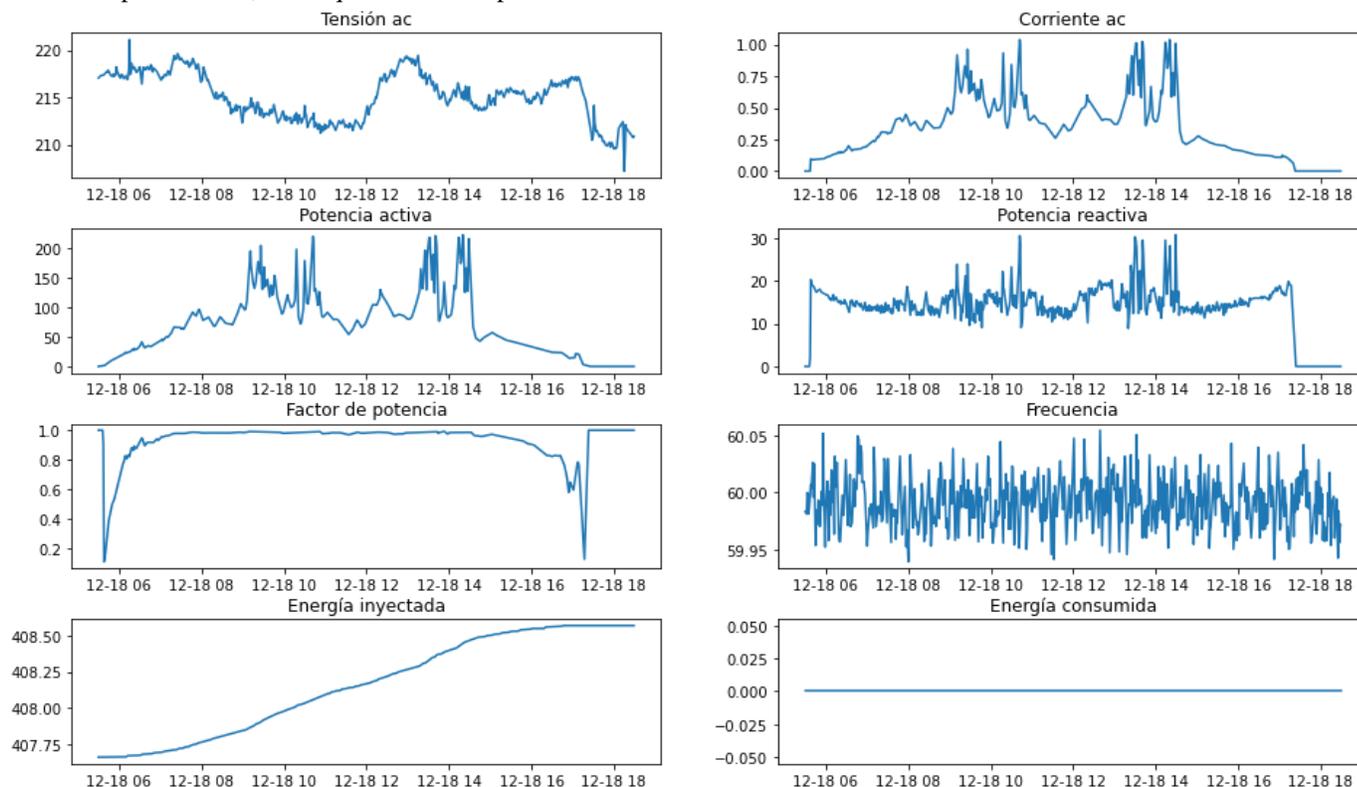


Figura 2. Comportamiento de parámetros eléctricos en corriente alterna del microinversor

El experimento consistió en mantener una carga constante durante el periodo de muestreo, conectada al microinversor, mientras se registraban varios parámetros eléctricos de los equipos. Posteriormente, se analizó e interpretó la información recopilada.

condiciones variables en cuanto a la disponibilidad de energía solar.

Esta investigación se enmarca en un enfoque de aplicación [11], donde se vinculan teorías y productos con base en los avances tecnológicos de la investigación básica.

Asimismo, se clasifica como una investigación exploratoria, ya que aborda temas poco estudiados o desconocidos en el contexto geográfico y climático de la región Puno. Este tipo de investigación proporciona una visión general del objeto de estudio, aunque superficial, como se menciona en [12].

En cuanto al diseño de la investigación, se adoptó un diseño preexperimental, caracterizado por tener un control mínimo sobre las variables. Para determinar las características de funcionamiento y la eficiencia del equipo, se recolectó una cantidad necesaria de datos del sistema de generación.

sistema de monitoreo y adquisición de datos que registra varios parámetros eléctricos, como potencia, voltaje, corriente, energía en corriente continua y corriente alterna, frecuencia y factor de potencia. La recolección de datos se realiza cada minuto, comenzando a las 5:30 a.m. y terminando a las 6:30 p.m., todos los días.

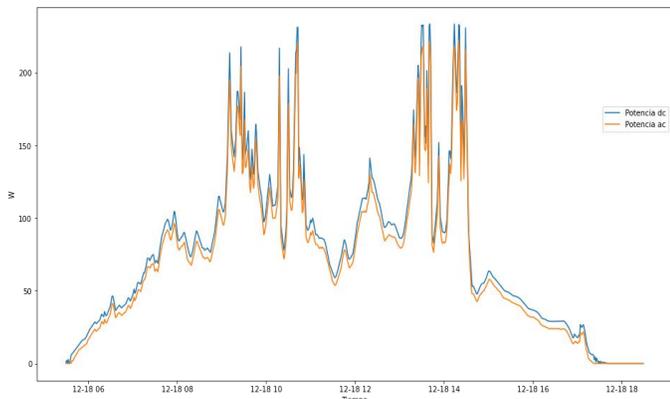


Figura 3. Potencia continua y alterna microinversor

El Procesamiento de la información, implica verificar las lecturas de los sistemas de medición sean correctas, los errores que encuentran en este procesamiento son lecturas negativas o vacías de corriente, tensión, potencia, energía, entre otras, por lo que para eliminar estas lecturas erróneas y reemplazarlas con valores adecuados se puede utilizar la interpolación de los puntos anteriores y posteriores [13]. Con la data recopilada, se crean varios reportes de parámetros eléctricos medidos. Estos informes se generan utilizando la aplicación Jupyter Notebook y se emplean las bibliotecas Pandas y Matplotlib, las cuales permiten la manipulación de datos y la representación en gráficos de gran calidad de esta información, respectivamente. Estas bibliotecas son parte del lenguaje de programación Python.

III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra las diversas fluctuaciones de los parámetros eléctricos tomados en el microinversor. El panel fotovoltaico que se utilizó tiene una capacidad de 270 W, mientras que el microinversor, según sus especificaciones técnicas, tiene una capacidad de entrada de 250 W, ha proporcionado una potencia de 225 W en corriente alterna, valor máximo medido.

La Figura 3 muestra la potencia suministrada al microinversor, contrastada con la generada por este. La diferencia entre estas refleja la potencia de pérdida por el consumo del microinversor.

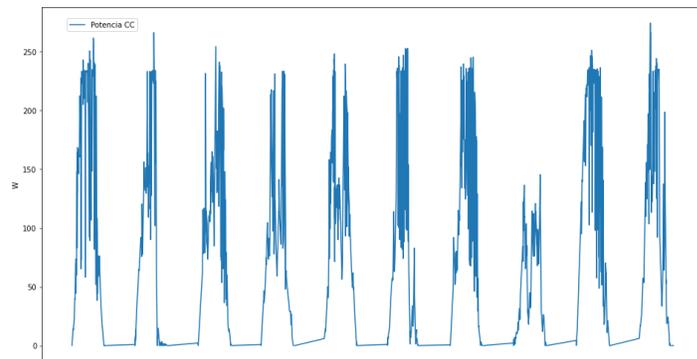


Figura 4. Potencia eléctrica producida por el panel fotovoltaico durante el periodo de evaluación.

Las Figuras 4 y 5 muestran los parámetros eléctricos del microinversor durante el período de evaluación.

Tanto la potencia en corriente continua como en corriente alterna se restringen, en el primer caso a niveles cercanos a los 250 W y en el segundo a alrededor de los 225 W. Estas tendencias son más evidentes durante los días en los que la incidencia solar es más constante. Es esencial considerar que el período de evaluación en nuestra región está marcado por intervalos de alta nubosidad y precipitaciones, lo que genera una irradiación solar irregular desde el punto de vista del recurso energético solar.

Tabla 1. Energía teórica y registrada del microinversor

Día	Teórica (kWh)	Registrada (kWh)	Diferencia (kWh)
15-Dic	1.23	1.52	- 0.29
16-Dic	0.91	0.97	- 0.06
17-Dic	1.39	1.18	+ 0.21
18-Dic	0.99	0.91	+ 0.08
19-Dic	1.48	1.23	+ 0.25
20-Dic	1.28	0.97	+ 0.31
21-Dic	1.26	1.18	+ 0.08
22-Dic	0.86	0.62	+ 0.24
23-Dic	1.65	1.67	- 0.02
24-Dic	0.99	1.20	- 0.21

Se puede analizar la disponibilidad de energía solar utilizando la información que se encuentra almacenada en el sitio web de la NASA Power Data Access Viewer, del cual se ha consultado la irradiación expresada en kWh/m². Una técnica para evaluar este recurso aplicado a sistemas fotovoltaicos es calcular la hora solar pico, considerando el valor estándar de 1000 W/m².

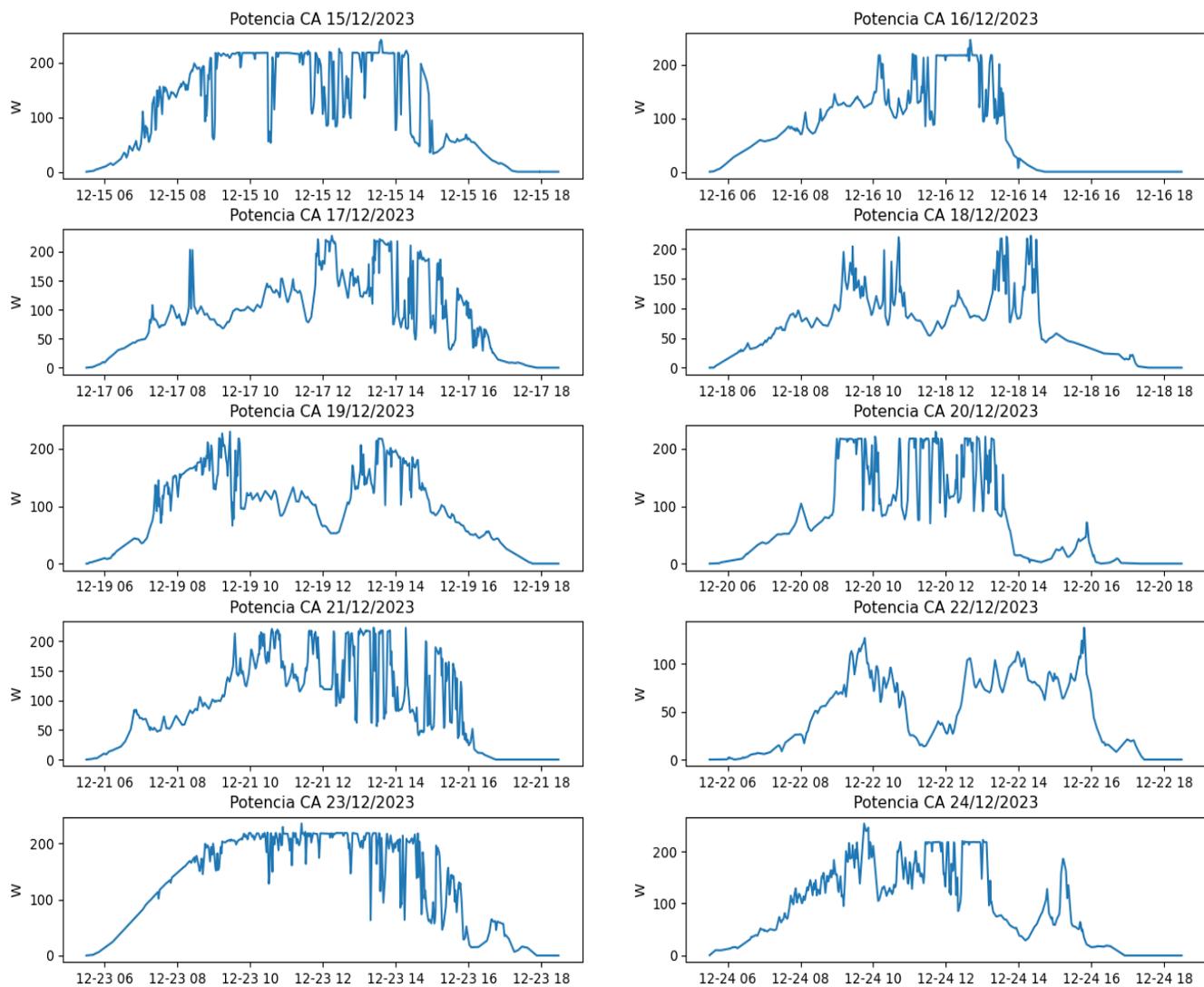


Figura 5. Potencia en corriente alterna del periodo de evaluación.

Multiplicando la Hora Solar Pico por la potencia del equipo, se puede evaluar teóricamente la energía que el microinversor podría producir, tomando en consideración la potencia que este produce, que según las especificaciones es de 225 W. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Si se compara la energía calculada teóricamente con la energía realmente producida, se observa una diferencia de 0.59 kWh. Estos resultados validan el uso de la información del sitio Web de la NASA, con lo que se puede estimar la energía que estos sistemas pueden producir en cualquier ubicación geográfica. No obstante, es necesario realizar más análisis de esta metodología en intervalos de tiempo mucho más extensos para obtener conclusiones más robustas y representativas.

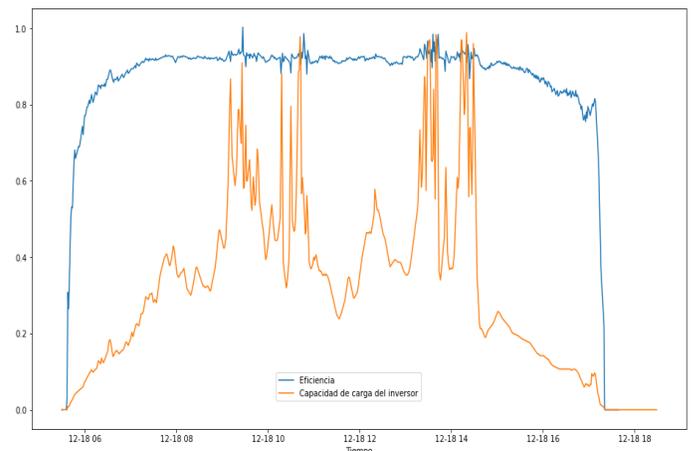


Figura 6. eficiencia versus capacidad de carga

Es esencial destacar que, aunque la potencia del generador fotovoltaico es de 270 W, el microinversor requiere una potencia de entrada de 250 W y entrega 225 W. Se debe mencionar que este equipo utiliza un optimizador de tipo MPPT para interactuar con el panel fotovoltaico y monitorear los puntos de máxima potencia. Esta configuración limita la potencia que el panel produce a la máxima permitida por el microinversor, dejando aún potencia disponible en el generador fotovoltaico.

Tabla 2. Consumo de energía del microinversor

Día	Energía en CC (kWh)	Energía en CA (kWh)	Consumo (kWh)	Porcentaje (%)
15-Dic	1.63	1.52	0.11	6.63
16-Dic	1.05	0.97	0.08	7.97
17-Dic	1.27	1.18	0.09	6.94
18-Dic	0.99	0.91	0.09	8.54
19-Dic	1.32	1.23	0.09	7.10
20-Dic	1.05	0.97	0.08	7.88
21-Dic	1.28	1.18	0.10	7.52
22-Dic	0.68	0.62	0.06	9.09
23-Dic	1.78	1.67	0.12	6.65
24-Dic	1.30	1.20	0.11	8.05

Para asegurar un funcionamiento óptimo de los sistemas de generación fotovoltaica, la potencia del microinversor debe ser al menos un 10% mayor a la del generador fotovoltaico [14]. Sin embargo, según las mediciones realizadas, se observa que el panel fotovoltaico puede producir más potencia eléctrica, por lo que se tenía energía sin utilizar, lo que indica que el sistema no opera en condiciones óptimas, como se evidencia en la figura 5, de debe tomar en cuenta que en la región altiplánica de Puno, se cuenta con un recurso solar mayor a otros lugares donde se utiliza esta energía [15].

Tabla 3. Eficiencia del microinversor

Día	Energía en CC (kWh)	Energía en CA (kWh)	Porcentaje (%)
15 - Dic	1.63	1.52	93.37
16 - Dic	1.05	0.97	92.03
17 - Dic	1.27	1.18	93.06
18 - Dic	0.99	0.91	91.46
19 - Dic	1.32	1.23	92.90
20 - Dic	1.05	0.97	92.12
21 - Dic	1.28	1.18	92.48
22 - Dic	0.68	0.62	90.91
23 - Dic	1.79	1.67	93.35
24 - Dic	1.31	1.20	91.95

Las mediciones durante este período permitieron determinar el consumo de energía del microinversor, como se detalla en la Tabla 2. Se observa que cuando el microinversor genera menos energía, el porcentaje de consumo de energía por parte

de los equipos aumenta, una conclusión similar a la obtenida por [16] al caracterizar un sistema solar fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

Si se analiza la Figura 6, se puede verificar que la eficiencia del microinversor está por encima del 90% cuando el coeficiente de carga es mayor al 20%. Esta observación concuerda con los hallazgos de [17], quienes encontraron eficiencias similares al evaluar microinversores.

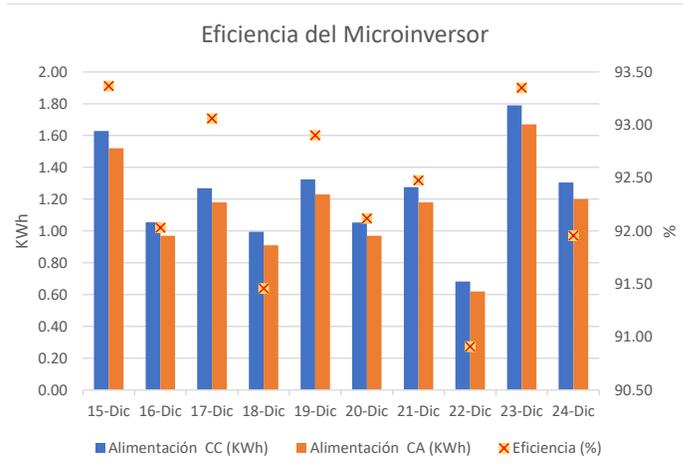


Figura 7. Eficiencia del microinversor

La eficiencia del microinversor se evalúa comparando la potencia de corriente continua y alterna, como se presenta en la Tabla 3. Durante el período de evaluación, se encontraron eficiencias entre el 90,90% y el 93,37%. Las eficiencias más bajas se registran cuando la energía generada en corriente continua es reducida. Los resultados obtenidos son consistentes con los valores reportados por [18] en el funcionamiento de inversores solares bajo condiciones similares.

IV. CONCLUSIONES

Para lograr la sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos, es crucial optimizar la utilización del recurso solar. La incorporación de microinversores conectados a la red eléctrica posibilita la utilización eficiente de esta energía en sistemas que funcionan con corriente alterna.

Entre los diversos factores que influyen en la generación fotovoltaica, la irradiación solar es fundamental, ya que con esta se puede determinar la cantidad de energía producida por cada microinversor. Tras realizar mediciones, se ha constatado que los distintos parámetros generados por el microinversor cumplen con los estándares establecidos por la Normas Peruanas.

Las potencias del microinversor son de 250 W en la entrada y 225 W en la salida, valores que han sido corroboradas durante las mediciones realizadas. A pesar de que la potencia del generador fotovoltaico es de 270 W, el microinversor limita la capacidad de generación a 250 W.

Se observa que el factor de potencia del microinversor se acerca a la unidad cuando opera por encima del 50% de su capacidad, mientras que al operar al 14% este es aproximadamente a 0.9, y para el 25% el factor de potencia es aproximadamente 0.95.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento especial al vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, el cual ha financiado el trabajo de investigación.

REFERENCIAS

[1] G. M. Molina and H. C. Melchor, "Prototipo de un sistema fotovoltaico autónomo," *Apl. la Ing.*, vol. 3, no. 8, pp. 9–18, 2016, [Online]. Available: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol3num8/Revista_Aplicaciones_de_la_Ingenieria_V3_N8_2.pdf.

[2] R. K. SURAPANENI, "Solar Microinverter Topologies for Photovoltaic Generation Systems," *PhD Thesis*, pp. 1–199, 2017.

[3] K. S. Kim, S. G. Jeong, and B. H. Kwon, "Single power-conversion DAB microinverter with safe commutation and high efficiency for PV power applications," *Sol. Energy*, vol. 193, no. September, pp. 676–683, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.09.087.

[4] C. L. Cortés Cortés, G. S. Gómez Gómez, F. Betancur Londoño, S. X. Carvajal Quintero, and N. Guerrero González, "Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales," *TecnoLógicas*, 2020. <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v23n47/2256-5337-teclo-23-47-3.pdf>.

[5] C. Santos Burguete, D. Masa Bote, A. C. Do Amaral Burghi, T. Hirsch, and R. Pitz-Paal, "Aplicaciones en energía solar," *Física del caos en la predicción meteorológica*, pp. 599–606, 2018, doi: 10.31978/014-18-009-x.38.

[6] E. Bravo Arche, "Uso de Microinversores en Sistemas Fotovoltaicos con Radiación Solar Reflejada Uso de Microinversores en Sistemas Fotovoltaicos con Radiación Solar Reflejada," 2016.

[7] J. Sosa, R. Ortega, V. Gracia, I. Salinas, and R. Tovar, "Estructuras de control para operación de un microinversor en modo red," vol. 1, no. 2, pp. 10–23, 2017.

[8] Q. Zhang, "Optimization and Design of Photovoltaic Micro-Inverter," *Optim. Des. Photovolt. Micro-Invert.*, no. 2013, pp. 2004–2019, 2013.

[9] W. F. Guerrero Flores, "Micro-inversor fotovoltaico submodular con conexión en cascada a red," 2018.

[10] A. Khan, L. Ben-Brahim, A. Gastli, and M. Benammar, "Review and simulation of leakage current in transformerless microinverters for PV applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. December 2016, pp. 1240–1256, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.053.

[11] J. Lozada, "Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria," *Cienciaamérica*, vol. 1, no. 3, pp. 34–39, 2016, [Online]. Available: <http://www.uti.edu.ec/documents/investigacion/volumen3/06Lozada-2014.pdf>.

[12] F. G. Arias-Odón, *El Proyecto de Investigación*, no. May. 2012.

[13] A. Alzahrani, P. Shamsi, C. Dagli, and M. Ferdowsi, "Solar

Irradiance Forecasting Using Deep Neural Networks," *Sci. Procedia Comput. Sci.*, vol. 114, pp. 304–313, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.09.045.

[14] O. Perpiñan Lamigueiro, *Energía solar fotovoltaica*. Creative Commons ebook, 2012.

[15] J. M. R. Cutipa *et al.*, "Occurrences of extreme solar irradiance at 3812 meters above sea level, at Lake Titicaca (Puno - Peru)," *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, 2020, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.553.

[16] J. K. Cohaila M., "Caracterización del Sistema Solar Fotovoltaico Conectado a la Red Eléctrica de La UNJBG Utilizando un Aplicativo Informático," 2018.

[17] C. Omaechea Ballesteros and V. Salas Merino, "Análisis Comparativo de Inversores Fotovoltaicos de Conexión a Red con Potencial Igual o Superior a 100 kW," *Director*, pp. 5–200, 2012, [Online]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15497/PFC_Clara_Ormaechea_Ballesteros.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[18] M. Vilca, "Diseño, implementación y análisis económico de un sistema fotovoltaico conectado a la red (sfcrs) de 2.16 kw con microinversor analizado en las condiciones geográficas y climatológicas de la ciudad de Juliaca," 2020.