

Performance of Wind and Photovoltaic Energy in Pumping Systems for Irrigation in Rural Areas of Peru

Pol Ardiles-Morales, BS Mechatronic Engineer¹, Dayanne Cochachin-Aguirre, BS Mechatronic Engineer¹, and Eliseo Zarate-Perez, PhDc Mechatronic Engineer¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN), 15314 Los Olivos, Perú, N00047654@upn.pe, N00068547@upn.pe, eliseo.zarate@upn.edu.pe

Abstract– Wind and photovoltaic energy are the most used sources of renewable energy due to their cleanliness, inexhaustibility, and suitability for agricultural applications. This project focuses on the needs of rural areas in Peru where the lack of conventional electrical power and water for irrigation is a concern. Therefore, the objective of this study is to select the most efficient renewable energy source for pumping systems in agricultural applications. We focus on the Sihuas area, located in the Ancash region, and evaluate both wind and photovoltaic energy through testing and comparison of results. The results show that both options are viable, but the photovoltaic source is more cost-effective and efficient, making it the most suitable option for water pumping in agriculture. Consequently, the use of this type of system is recommended for pumping applications in agriculture.

Keywords – Wind energy, photovoltaic energy, comparative analysis, agricultural applications.

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

Desempeño de la Energía Eólica y Fotovoltaica en Sistemas de Bombeo para Riego en Áreas Rurales de Perú

Pol Ardiles-Morales, BS Mechatronic Engineer¹, Dayanne Cochachin-Aguirre, BS Mechatronic Engineer¹, and Eliseo Zarate-Perez, PhD Mechatronic Engineer¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN), 15314 Los Olivos, Perú, N00047654@upn.pe, N00068547@upn.pe, eliseo.zarate@upn.edu.pe

Resumen— *La energía eólica y fotovoltaica son las fuentes de energía renovable más utilizadas por ser limpias, inagotables y adecuadas para aplicaciones agrícolas. Este proyecto se enfoca en las necesidades de las zonas rurales de Perú, donde la falta de energía eléctrica convencional y agua para el riego es una preocupación. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es seleccionar la fuente de energía renovable más eficiente para sistemas de bombeo en aplicaciones agrícolas. Nos enfocamos en la zona de Sihuas, ubicada en la región de Ancash, y evaluamos tanto la energía eólica como la fotovoltaica a través de pruebas y comparación de resultados. Los resultados muestran que ambas opciones son viables, pero la fuente fotovoltaica es más económica y eficiente, lo que la hace la opción más adecuada para el bombeo de agua en la agricultura. En consecuencia, se recomienda el uso de este tipo de sistema para aplicaciones de bombeo en la agricultura.*

Palabras clave— *Energía eólica, energía fotovoltaica, análisis comparativo, aplicaciones de agricultura.*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los problemas ambientales tienen sus raíces en la falta de conciencia y la debilidad cultural del ser humano hacia la naturaleza, la cual provee de diversas fuentes de energía [1]. Es por ello que el uso indiscriminado de los recursos naturales ha sido perjudicial en los últimos años. Sin embargo, el aumento de los costos de energía ha llevado a que algunas zonas rurales aún no dispongan de estos recursos fundamentales para las actividades humanas [2]. Por esta razón, las energías renovables juegan un papel muy importante, especialmente en ciudades y localidades rurales. Por ejemplo, la sierra del Perú carece de energía eléctrica para aplicarla en la agricultura [3].

Durante los últimos años, el gobierno peruano ha obtenido datos estadísticos sobre la electrificación a nivel nacional. Esto ha revelado que algunas zonas rurales aún no cuentan con el servicio de energía eléctrica. Por ello, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) implementó proyectos de electrificación rural en 2011. Esto se debe a que alrededor del 36,6% de las zonas rurales altoandinas del Perú no tienen acceso a la electricidad [4].

Las energías renovables no solo brindarían electricidad a los centros poblados alejados, sino que también se pueden utilizar en sistemas de agricultura, como los sistemas de riego

más tecnificados [5]. La energía fotovoltaica (FV) y eólica se han utilizado en diferentes aplicaciones a nivel mundial por su buen desempeño, aunque estas energías dependen de ciertas condiciones ambientales, como la irradiación solar, la claridad, la temperatura, la velocidad del viento, entre otras. Por lo tanto, se requiere de datos fiables para realizar la evaluación. Sin embargo, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) desarrolló la plataforma web denominada The Perú Renewable Energy Data Explorer (RE-DATA Explorer), donde se encuentran datos de la irradiación solar y otras variables necesarias para evaluar el potencial energético [6].

En la literatura, se encuentran varias evaluaciones de energías renovables en la agricultura para sistemas de bombeo. En [7], se utilizó un enfoque de modelado del sistema eólico para simular el desempeño energético en función de la demanda. Esta energía se evaluó para determinar la capacidad de suministro de riego y comprobar la demanda. Asimismo, en [8], se informa que la energía eólica no fue suficiente para proporcionar energía al sistema de irrigación durante los períodos de mayor consumo de agua. Sin embargo, el sistema de bombeo adaptado mejoró el desempeño cuando se incorporó un sistema de almacenamiento por baterías al sistema eólico.

El estudio realizado por [9] sobre el sistema de bombeo de agua con energía solar FV ha sido una solución para satisfacer la demanda de aplicaciones de irrigación agrícola. El objetivo de este estudio fue diseñar y simular el sistema de bombeo de agua solar FV utilizando el software PVsyst. Los resultados fueron prometedores y se mostraron las pérdidas del sistema durante todo el año, así como su eficiencia. Esto coincide con otro trabajo en el que se demostró que el sistema PV aislado con banco de baterías resultó ser el más adecuado según los resultados obtenidos en la simulación con HOMER [10].

Estas propuestas constituyen una contribución interesante para futuras soluciones energéticas en áreas rurales aisladas y de bajos ingresos. Estos trabajos confirman que estas aplicaciones brindan diferentes beneficios a las comunidades, como la reducción de la contaminación del aire, la mejora del acceso a la comunicación y la posibilidad de estudiar por la noche con luz adecuada, pero también señalan una ampliación de las capacidades en otras áreas no consideradas por la

organización no gubernamental, como las aplicaciones agrícolas [11].

El presente trabajo responde a la problemática existente en la sierra del Perú por el aprovechamiento del agua, ya sea para la minería o la agricultura. La agricultura es la más afectada, y los pueblos rurales de Perú requieren sistemas de irrigación tecnificados, pero no cuentan con energía eléctrica o la tienen de forma limitada. Por lo tanto, el objetivo principal es realizar una comparación de rendimiento entre los sistemas eólicos y PV para un sistema tecnificado de bombeo. Se optó por este tipo de energías renovables porque hay dispositivos comerciales disponibles para distintas aplicaciones.

II. METODOLOGÍA

A. Toma de datos en la ubicación proyectada

Se llevaron a cabo las mediciones en el centro poblado de Sihuas, ubicado en el departamento de Ancash, con coordenadas de latitud: -8,5541 y longitud: -77,5910, a una altura aproximada de 2730 msnm. Una vez obtenidas las coordenadas, se recopiló información sobre los datos solares, eólicos y meteorológicos en la zona. Estos datos fueron recopilados de METEONORM, SOLCAST, PVGIS, NASSA POWER y SENAMHI [12][13][14][15][16]. Debido a que estos softwares tienen una base de datos similar y trabajan de manera satelital, pudimos obtener los datos necesarios y realizar una comparación para determinar cuál sistema, fotovoltaico o eólico, es más eficiente para la localidad. De esta manera, obtendremos los datos más precisos y podremos seleccionar el sistema renovable más eficiente para la localidad.

i. Datos recolectados Fotovoltaicos: Se determinó la ubicación exacta del lugar de estudio mediante coordenadas, donde se midió la irradiación, temperatura, velocidad del viento y carga eléctrica. Estos datos fueron necesarios para estimar y simular el sistema propuesto. En la Tabla I se muestra la recopilación de datos meteorológicos y en la Figura 1 se presenta la irradiación mensual. Estos datos fueron obtenidos a partir de la fuente [17].

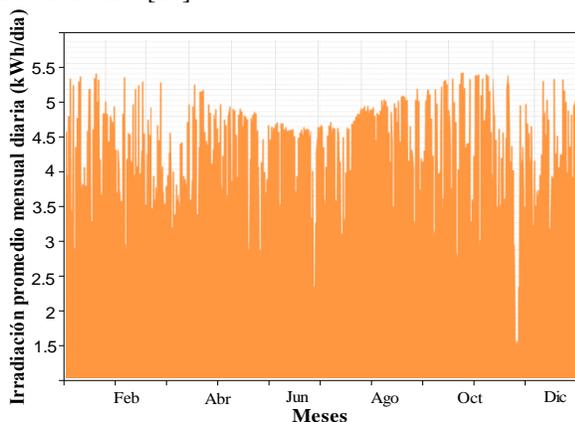


Fig. 1 Irradiación mensual diaria. Fuente: [17].

TABLA I
PROMEDIO DE IRRADIACIÓN MENSUAL

| Meses | Irradiación (kWh/m ² /día) |
|-----------|---------------------------------------|
| Enero | 2.78 |
| Febrero | 2.57 |
| Marzo | 6.44 |
| Abril | 6.34 |
| Mayo | 6.18 |
| Junio | 6.10 |
| Julio | 6.03 |
| Agosto | 6.02 |
| Setiembre | 5.83 |
| Octubre | 5.70 |
| Noviembre | 6.30 |
| Diciembre | 6.39 |

Fuente. [17]

ii. Datos recolectados Eólicos: La tabla II se muestra los datos recolectados necesarios para el desarrollo de la proyección de energía eólica, tomando las características de velocidad del viento mediante la fuente NREL y pudiendo ver el comportamiento de forma gráfica la Fig. 2.

TABLA II
VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO

| Meses | Velocidad del viento (m/s) |
|-----------|----------------------------|
| Enero | 4.60 |
| Febrero | 4.10 |
| Marzo | 4.09 |
| Abril | 3.60 |
| Mayo | 4.10 |
| Junio | 3.60 |
| Julio | 3.60 |
| Agosto | 4.10 |
| Setiembre | 4.10 |
| Octubre | 4.09 |
| Noviembre | 4.60 |
| Diciembre | 4.10 |

Fuente. [17]



Fig. 2 Velocidad del viento promedio mensual. Fuente: [17].

B. Softwares usados para la elaboración del proyecto

En la elaboración de este proyecto se utilizaron dos softwares profesionales: Homer Pro y PV Syst. El primer software se utilizó para el modelamiento de energía renovable eólica, mientras que el segundo se usó para la simulación de la energía fotovoltaica. PV Syst tiene la ventaja de estimar la

mejor opción necesaria al ingresar los parámetros del sistema, entre otras ventajas del software.

i. Software Homer pro: Este software es una herramienta que cuenta con diversas configuraciones, como la obtención de datos satelitales de la zona donde se desea trabajar, y proporciona información sobre cuál sistema de energía es óptimo para el lugar. De esta manera, se pueden analizar y realizar diferentes simulaciones según las coordenadas que se introduzcan en el sistema, lo que permite encontrar la combinación más adecuada, considerando siempre criterios técnicos y económicos. Además, su interfaz sencilla facilita su uso y reduce la posibilidad de errores durante la realización del proyecto [18].

ii. Software PV Syst: Este software es una herramienta de simulación que permite examinar y analizar datos de sistemas fotovoltaicos, incluyendo diseños de sistemas conectados o desconectados de la red. Además, permite realizar cálculos detallados y utilizar diferentes parámetros, e importar datos climáticos de diversas fuentes. El programa ofrece 3 niveles de estudio del sistema fotovoltaico [19]. En este proyecto, se utilizó el software para simular la energía eólica en el pueblo de Sihuas, lo que nos permitió obtener la radiación del lugar, la carga eléctrica ejercida en el motor y el consumo de energía durante un periodo de un año.

C. Modelo de sistema fotovoltaico

El panel fotovoltaico se compone de asociaciones en paralelo de células fotovoltaicas, las cuales son las unidades básicas de generación eléctrica. Para su modelamiento, se utilizan expresiones matemáticas provenientes del circuito equivalente de diodo sencillo, tal como se muestra en la Fig.3. Al variar la carga conectada a los paneles, manteniendo constantes la temperatura y la irradiancia, la corriente y la tensión cambian, lo que produce las curvas características I-V [20].

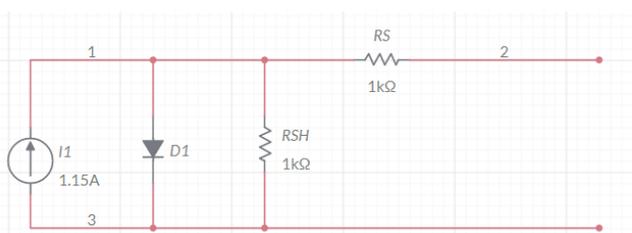


Fig. 3 Circuito equivalente de una celda fotovoltaica de un diodo sencillo
Teoría de las celdas solares

D. Modelo de sistema eólico

La energía eólica es una de las tecnologías de energía renovable más grandes, desarrolladas y utilizadas comercialmente para la generación de electricidad. Durante el período 2001, experimentó un crecimiento anual promedio del 28%, y su capacidad instalada promedio se ha duplicado cada 3 años.

La característica principal de los sistemas de energía eólica es la variabilidad del viento. El viento se produce debido al calentamiento irregular de la superficie terrestre por parte del sol. Las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, que luego es utilizada para accionar un generador y producir energía eléctrica limpia [22]. Sin embargo, la eficiencia de esta energía puede verse afectada por las características locales del terreno, como la geografía, la altitud y la topografía, lo que puede generar factores a largo plazo [23]. Para obtener la velocidad del viento de la zona, es importante realizar mediciones con un anemómetro de cazoletas. La potencia del viento por unidad de área en función de la velocidad se describe mediante la Ecuación 1.

$$P = A \frac{1}{2} (\rho v)^3 \quad (1)$$

Donde, P es la potencia (w/m²), A es el área perpendicular a la dirección del viento, ρ es la densidad del aire (kg/m³) y V es la velocidad del viento (m/s)

E. Modelo del sistema de almacenamiento por baterías (BESS)

Los modelos para sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías, utilizados en sistemas de energía renovable, involucran tecnologías como plomo-ácido, níquel-hidruro metálico, níquel-cadmio e iones de litio [24]. Existen diversas metodologías para determinar la tecnología óptima, siendo una de las más utilizadas la ley de Peukert. Esta ley establece una relación entre el estado de carga de una batería y su tasa de descarga, lo que significa que cuanto mayor sea la tasa de descarga, menor será la capacidad de la batería para durar. La ecuación 2 presenta la ley de Peukert [25].

$$C_p = I^k \cdot t \quad (2)$$

Siendo, Cp la capacidad de descarga de la batería a I amperio, I es la corriente de descarga real (A), t es el tiempo de descarga real (h) y k es la constante de Peukert (adimensional).

Por otro lado, también se puede utilizar el modelo de Shepherd para calcular el estado de carga de una batería a partir de parámetros internos, como los voltajes medidos. En su versión mejorada, se evita la generación de un bucle matemático, lo que permite obtener resultados más precisos de la descarga. La Ecuación 3 se emplea para modelizar la batería [25].

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} - R \cdot i + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (3)$$

Donde E es la tensión sin carga (V), E0 es la constante de voltaje de la batería (V), K es el voltaje de polarización (V), Q es la capacidad de la batería (Ah), i·t es el estado de carga instantáneo (Ah), A es el voltaje del inicio de la zona exponencial (V), B es el inverso de la constante de tiempo de la zona exponencial (Ah)⁻¹, R es la resistencia interna (Ω), e i es la intensidad instantánea (A). Este modelo puede ser

representado por una fuente de voltaje controlada simple en serie con una resistencia constante, tal como se muestra en la Figura 2 [26].

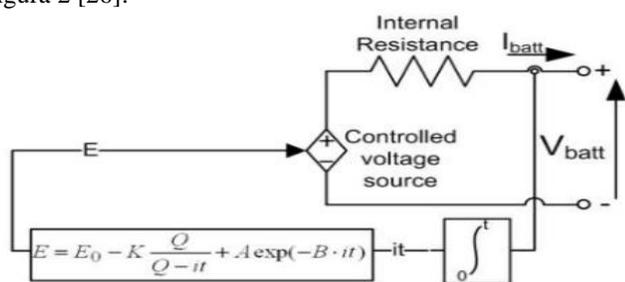


Fig. 4 Modelo de Shepherd

III. RESULTADOS

A. Implementación de sistema fotovoltaico

La característica técnica del panel solar seleccionado para el sistema fotovoltaico mostrado en la tabla III incluye los parámetros necesarios para satisfacer el consumo de la bomba del sistema de riego y garantizar un funcionamiento óptimo. Se eligieron los parámetros en función de las características del módulo, en este caso, un panel policristalino de 250 W. La potencia se determinó mediante una simulación realizada en Simulink/MATLAB, considerando las condiciones estándar (STC) de temperatura de celda de 25°C, irradiación de 1000 W/m² y masa de aire AM de 1.5. La simulación se realizó durante 15 segundos con un incremento de 0.5 V por segundo [27].

TABLA III
DATOS TECNICOS DEL PANEL FOTOVOLTAICO

| Especificaciones | Parámetros |
|--|----------------|
| Tipo de Módulo PV | Policristalino |
| Potencia de salida (P _{máx}) | 270W |
| Corriente Cortocircuito (I _{sc}) | 9.31 A |
| Tensión de circuito abierto (V _{oc}) | 38.31 V |
| Corriente máxima (I _{mp}) | 8.76 A |
| Tensión Máxima (V _{mp}) | 30.82 V |
| Tolerancia de potencia | 0-+5W |

Fuente: Auto Solar [28]

B. Simulación de sistema energía fotovoltaico mediante software PV Syst.

En la Figura 5 se muestra el resultado de la simulación realizada con el software PV Syst, donde se detallan las características de consumo del sistema, la energía no utilizada (0.31 kWh/kWp/día), las pérdidas fotovoltaicas (0.31 kWh/kWp/día) y la energía efectiva (4.79 kWh/kWp/día) de la bomba. Se muestra la información de forma mensual durante un año para el sistema de regadío, evidenciando la relación entre la energía efectiva y la carga del consumo de la bomba. Cada barra de diferente color representa las cantidades de energía eléctrica fotovoltaica generada, consumida y las pérdidas. Según [27], en su estudio se observa que la simulación mediante el software PV Syst, con las características del sistema proporcionado para la captación y las pérdidas del

sistema renovable fotovoltaico, muestra que agosto es el mes de mayor producción energética fotovoltaica.

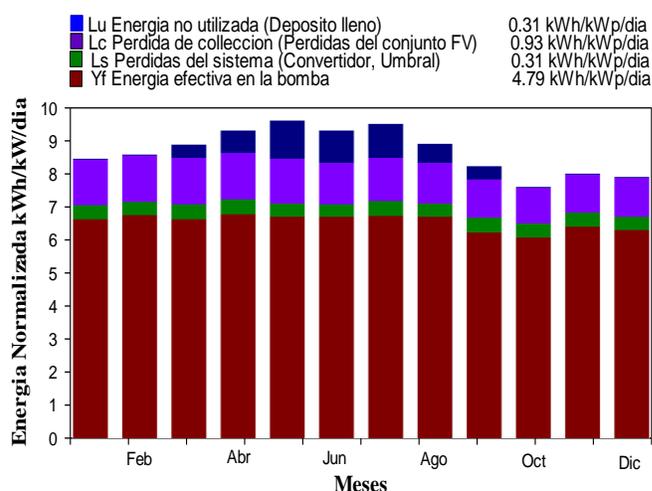


Fig. 5 Simulación del sistema eléctrico fotovoltaico usando la bomba seleccionada

C. Implementación de sistema eólico

Para la selección de la turbina eólica se tuvieron en cuenta los parámetros de carga de la bomba en el sistema de regadío, lo que permitió determinar el dimensionamiento adecuado. En la tabla IV se presentan los datos técnicos relevantes, como la potencia de salida, las opciones de salida, las RPM de trabajo, el peso y las características de los materiales de fabricación.

En el estudio [29], se detallan las especificaciones técnicas de la turbina eólica, incluyendo los rangos considerados para el sistema en función de la velocidad del aire, la energía obtenida en relación con la velocidad de giro y el tiempo. Además, se calculó la factibilidad del proyecto.

TABLA IV
DATOS TECNICOS DE TURBINA EOLICA

| Especificaciones | Parámetros |
|---------------------|------------------|
| Potencia de salida | 650W |
| Opciones de voltaje | 12/48 V |
| Potencia Pico | 750W |
| RPM | 50/60HZ |
| Diámetro de rotor | 2.2m |
| Numero de cuchillas | 3 |
| Material compuesto | Fibra de carbono |
| Peso | 39kg |

D. Simulación de energía eléctrica en sistema eólico usando el software HOMER PRO

La Figura 6 presenta los resultados de la simulación del sistema eólico utilizando el software HOMER Pro. En esta figura, se puede observar la carga estimada de 2.5 kW que se requerirá durante un año para el sistema de regadío mediante bombeo. Los resultados muestran que el sistema es capaz de mantener una estabilidad energética adecuada a lo largo del

tiempo, lo que sugiere que la turbina eólica seleccionada es capaz de cubrir las necesidades energéticas del sistema de riego de manera confiable.

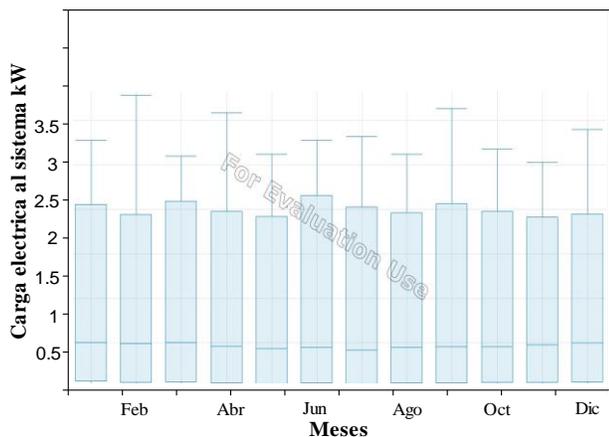


Fig. 6 Carga eléctrica eólica total servida en promedios mensuales

E. Implementación de la bomba

Se tomaron en cuenta varios aspectos para seleccionar la bomba, como la dimensión del campo y la energía que se requerirá para alimentarla. Posteriormente, en la tabla V se presentan los datos técnicos de la bomba seleccionada mediante el uso del software PV Syst. Según [30], el primer paso para seleccionar una bomba es conocer los valores de altura, distancia y rugosidad de la tubería, y luego calibrarla usando datos de presión y caudal para determinar la demanda requerida. Se afirma que seguir estos criterios puede generar un ahorro del 4.7% en los costos de energía de bombeo. Además, en la tabla V se pueden observar otros parámetros relevantes de la bomba seleccionada, como el caudal máximo y la potencia necesaria para su funcionamiento.

TABLA V
DATOS TECNICOS DE LA BOMBA

| Especificaciones | Parámetros |
|---------------------|---------------|
| Instalación | Monofásica CC |
| Modelo | SDS-D-128 |
| Presión | 10 bar |
| Q(l/min) | 4.546 |
| Tensión | 30 V |
| Corriente | 3.3 A |
| Diámetro de entrada | 1" |
| Diámetro de salida | 1" |

Fuente: Sun Pums [31].

La Figura 7 ilustra la relación entre la irradiación global efectiva y el volumen de agua bombeado, evidenciando la progresiva linealidad del sistema a lo largo del día. Además, muestra la relación promedio entre el caudal de agua bombeado y la energía suministrada por el sistema, presentando un incremento gradual tanto en el caudal como en la energía. Cabe destacar que, según los datos proyectados, se requerirá una cantidad de 4.8 kWh/kWp/día para satisfacer las necesidades de funcionamiento de la bomba, los cuales fueron simulados por

separado teniendo en cuenta el consumo estimado de la bomba [32].

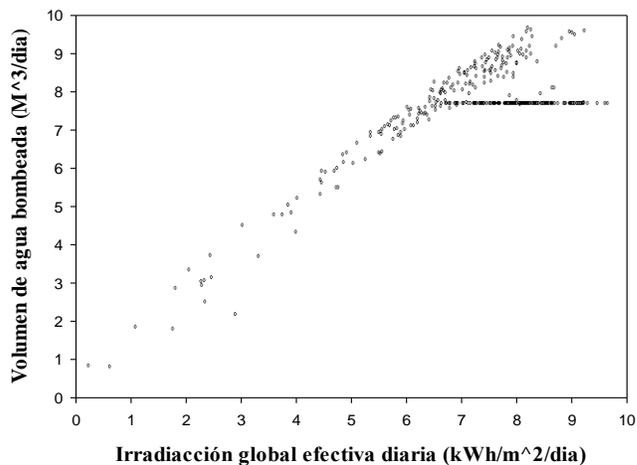


Fig. 7 Proyección del volumen de agua bombeada con referencia a la irradiación

F. Costo en implementación del sistema de bombeo

La Figura 8 ilustra la relación lineal entre la energía suministrada por el sistema híbrido fotovoltaico y eólico y el caudal de agua en metros cúbicos. La tabla VI detalla las características técnicas de algunos de los materiales necesarios para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema de bombeo alimentado por energías renovables en el dimensionado adecuado.

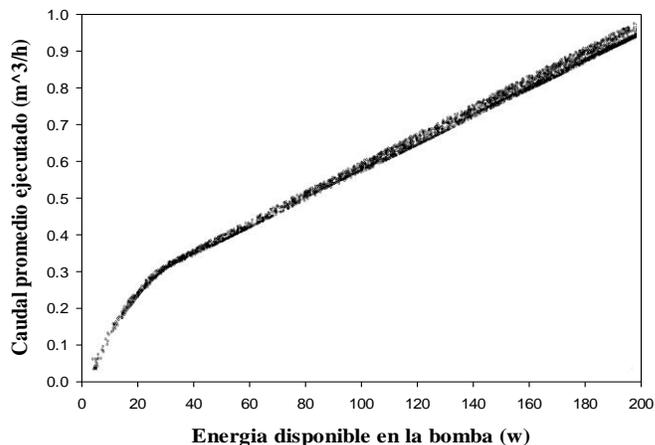


Fig. 8 Caudal promedio respecto a la energía eléctrica

TABLA VI

LISTA DEL SISTEMA DE BOMBEO PRESUPUESTO ESTIMADO

| Concepto | Cantidad | Precio Final |
|---------------------------|----------|--------------|
| Bomba sumergida SDS-D-128 | 1 | S/1500 |
| Válvula globo | 1 | S/12 |
| Tubo PVC 1" | 5 | S/85 |
| Unión universal | 2 | S/12 |
| Codo 90° | 2 | S/6 |
| Válvula pie | 1 | S/37 |
| Pegamento PVC azul | 1 | S/30 |

| | | |
|-----------------------------|---|-------|
| Soporte para bomba | 1 | S/300 |
| Cinta de goteo y accesorios | 1 | S/900 |

Fuente: Sodimac

G. Costo en implementación del sistema fotovoltaico

La tabla VII muestra algunos de los componentes necesarios para la implementación del sistema fotovoltaico, considerando el dimensionamiento de carga que se tendrá. Los precios mostrados son referenciales y pueden variar según el lugar y la temporada. Finalmente, se evaluó el precio generado de \$3,225 para su proyecto de implementación y se determinó que cubriría el área seleccionada utilizando módulos fotovoltaicos. Conocer el costo neto del sistema permitió evaluar el período de recuperación, que resultó ser de 7.3 años.

TABLA VII
LISTA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PRESUPUESTO ESTIMADO

| Componentes y materiales | Cantidad | Precio total |
|-------------------------------------|----------|--------------|
| Panel solar policristalino 270W 24V | 1 | S/800 |
| Controlador MPPT 24V | 1 | S/1400 |
| Batería AGM 12V 12A | 2 | S/200 |
| Accesorio para conexión y cableado | 1 | S/350 |
| Llave termomagnética | 1 | S/30 |
| Soporte metálico | 1 | S/600 |

H. Costo en implementación del sistema eólico

La tabla VIII muestra los componentes y materiales necesarios para la implementación del proyecto, junto con su cantidad y precio referencial obtenido en el supermercado Sodimac. Es importante tener en cuenta que estos precios son referenciales y pueden variar según las condiciones del mercado y la fluctuación del dólar. El proyecto llevado a cabo por [33] demuestra la importancia de desarrollar y evaluar el rendimiento de un sistema de generación eólica innovador para determinar el modelo y los componentes específicos necesarios, lo que permitirá una estimación más precisa del costo total del proyecto.

TABLA VIII
LISTA DE SISTEMA EOLICO PRESUPUESTO ESTIMADO

| Componentes y materiales | Cantidad | Precio total |
|------------------------------------|----------|--------------|
| Turbina AWS 650 | 1 | S/2800 |
| Batería 12VRE-3000TF | 1 | S/600 |
| Llave termomagnética | 1 | S/30 |
| Accesorio para conexión y cableado | 1 | S/350 |

IV. CONCLUSIONES

En el desarrollo de la implementación de energía renovable para uso rural mediante la tecnología eólica y fotovoltaica, se obtuvieron resultados positivos que cumplen con los requisitos mínimos propuestos para el sistema de riego. Al igual que en el

estudio realizado por [27], se tuvieron en cuenta las características climatológicas del área a regar y el lugar de partida para la simulación, utilizando los softwares PV Syst y Homer Pro para evaluar el funcionamiento y proyección del sistema.

Las figuras 5 y 8 muestran la eficiencia de ambos sistemas de riego en la localidad durante todo el tiempo analizado. Las tablas VI, VII y VIII proyectan el costo de implementación de cada sistema renovable, tanto fotovoltaico como eólico, para cubrir el consumo del sistema de riego. En referencia a los dos sistemas renovables, se tiene una proyección de costo menor para el fotovoltaico, haciéndolo factible económicamente.

Entre las limitaciones encontradas en el estudio se destacan los altos costos de los sistemas de energía renovable y la falta de difusión entre la población que vive en lugares remotos. Se recomienda para próximos trabajos tener claridad en las secuencias del estudio y recopilar datos de fuentes confiables y actualizadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo en parte de la Universidad Privada del Norte (UPN).

REFERENCIAS

- [1] H. Meiboudi, A. Lahijanian, S. M. Shobeiri, S. A. Jozi, and R. Azizinezhad, "Creating an integrative assessment system for green schools in Iran," *J Clean Prod*, vol. 119, pp. 236–246, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.004.
- [2] C. Barreto and J. Duffy, "Low-cost solar drip irrigation for small farmers in developing countries," *38th ASES National Solar Conference 2009, SOLAR 2009*, vol. 4, pp. 2240–2292, 2009.
- [3] K. Bartl, F. Verones, and S. Hellweg, "Life cycle assessment based evaluation of regional impacts from agricultural production at the Peruvian coast," *Environ Sci Technol*, vol. 46, no. 18, pp. 9872–9880, Sep. 2012, doi: 10.1021/ES301644Y.
- [4] L. Gaslac, S. Willis, G. Quispe, and C. Raymundo, "A hybrid energy system based on renewable energy for the electrification of low-income rural communities," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 168, no. 1, Jul. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/168/1/012005.
- [5] W. P. Mitchell, "Irrigation and Community in the Central Peruvian Highlands," *Am Anthropol*, vol. 78, no. 1, pp. 25–44, Mar. 1976, doi: 10.1525/AA.1976.78.1.02A00030.
- [6] S. El and I. Nacional, "Planificación Energética y Energías Renovables".
- [7] D. Shively, T. Haynes, and J. Gardner, "Using wind energy to offset irrigation costs: A systems-modeling case study," *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2009, doi: 10.2514/6.2009-1549.
- [8] R. N. Clark, "WIND ENERGY FOR PUMPING IRRIGATION WATER.," *Commission of the European Communities, (Report) EUR*, pp. 755–760, 1985.
- [9] Krishnakant and P. S. Kulkarni, "Design and Simulation of Solar Photovoltaic Water Pumping System," *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies, ICEPE 2020*, Mar. 2021, doi: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404473.
- [10] M. G. Zuñiga, E. A. Flores, and J. C. A. Merino, "Hybrid System (Solar-Wind) Management for Generating Electricity in High Andean Rural Regions in Peru," *Proceedings of the 2018 IEEE Sciences and Humanities International Research Conference, SHIRCON 2018*, Dec. 2018, doi: 10.1109/SHIRCON.2018.8593062.
- [11] Á. Fernández-Baldor, A. Boni, P. Lillo, and A. Hueso, "Are technological projects reducing social inequalities and improving people's well-being? A capability approach analysis of renewable energy-based electrification

- projects in Cajamarca, Peru,” *J Human Dev Capabil*, vol. 15, no. 1, pp. 13–27, 2014, doi: 10.1080/19452829.2013.837035.
- [12] “Meteonorm.” <https://meteonorm.com/en/> (accessed Feb. 17, 2023).
- [13] “Solcast | Api solar y herramienta de pronóstico del tiempo solar.” <https://solcast.com/> (accessed Feb. 17, 2023).
- [14] “PVGIS meteorological Data.” https://www.pvsyst.com/help/meteo_source_pvgis.htm (accessed Feb. 17, 2023).
- [15] “NASSA POWER.” <https://power.larc.nasa.gov/> (accessed Feb. 17, 2023).
- [16] SENAMHI, “SENAMHI - Perú.” <https://www.senamhi.gob.pe/?p=senamhi>
- [17] “Wind Power - System Advisor Model - SAM.” <https://sam.nrel.gov/wind.html> (accessed May 10, 2023).
- [18] L. G. Gratal and A. Aguilar Bail, “MICROCENTRAL HÍBRIDA DE GENERACIÓN POR MEDIO DE ENERGÍAS RENOVABLES,” *Carlos García Martín*, pp. 1–79, 2019.
- [19] F. Limem and S. Sezen, “Comparative Analysis of Different Photovoltaic Simulation Software : Case Study on Analyzing the Performance of a 5 , 1 kWp Grid Connected Photovoltaic System,” no. 32, pp. 816–826, 2021, doi: 10.31590/ejosat.1040126.
- [20] A. Z. Martínez and M. Santos, “MODELO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PORTÁTIL,” pp. 2–4, 2015.
- [21] M. Arshad, “Clean and Sustainable Energy Technologies,” *Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches*, pp. 73–89, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-805423-9.00003-X.
- [22] “Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad Una guía para Nuevo México”.
- [23] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, and Bossanyi E, “WIND ENERGY HANDBOOK,” 2001.
- [24] “Baterías para energía eólica.” <https://energia.roams.es/energia-renovable/energia-eolica/baterias/> (accessed Feb. 18, 2023).
- [25] J. Martínez, “Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas,” *Etsuib*, p. 53, 2017.
- [26] D. F. R. Millán, “Modelado y simulación de una estación de carga de energética en bicicletas eléctricas”.
- [27] J. C. Díaz-Guillén, M. A. Jiménez, and M. Osorio, “MODELADO Y SIMULACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES,” 2014, doi: 10.13140/2.1.4192.8968.
- [28] AutoSolar, “Panel Solar 270W Talesun Policristalino .” <https://autosolar.pe/paneles-solares-de-red/panel-solar-270w-talesun-policristalino> (accessed May 10, 2023).
- [29] A. Alkhalidi, A. Abuothman, H. Abbas, B. Al-Duqqah, T. Nofal, and R. S. Amano, “Cantilever wind turbines installation to harvest accelerated wind in dams (hybrid floating PV – Wind system),” *Renewable Energy Focus*, vol. 40, pp. 39–47, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ref.2021.11.005.
- [30] Y. Wang, Q. Zhao, W. Wu, A. Willis, A. R. Simpson, and E. Weyer, “Improved Pump Setpoint Selection Using a Calibrated Hydraulic Model of a High-Pressure Irrigation System,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 33, pp. 72–77, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.IFACOL.2022.11.012.
- [31] Sun Pumps, “SDS-D-128.” <https://www.sunpumps.com/Products/SDS-D-128> (accessed May 10, 2023).
- [32] L. Gaslac, S. Willis, G. Quispe, and C. Raymundo, “A hybrid energy system based on renewable energy for the electrification of low-income rural communities,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 168, no. 1, Jul. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/168/1/012005.
- [33] X. Chen *et al.*, “Development and performance evaluation of a novel wind generation system for the floating wind turbine model test,” *Ocean Engineering*, vol. 270, p. 113384, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.113384.