

ARTÍCULO ORIGINAL**Prototipo de aerogenerador de eje vertical para bajas velocidades de viento en Cruz Grande, Jaén****Prototype vertical axis wind turbine for low wind speeds in Cruz Grande, Jaén**Fuentes, F. ¹ , Sánchez, J. ² , Palacios, R. ³  y Núñez, L. ⁴ **RESUMEN**

La limitada disponibilidad de energía eléctrica en zonas alejadas de la red pública motiva la evaluación del recurso eólico como alternativa para el abastecimiento energético local. En este contexto, la investigación tuvo como objetivo implementar y evaluar un prototipo de aerogenerador de eje vertical diseñado para operar con bajas velocidades de viento en el caserío Cruz Grande, distrito de Jaén. El estudio fue de tipo aplicado, con diseño experimental. Para el dimensionamiento se consideró una velocidad de viento de 2.72 m/s, una densidad del aire de 1.09 kg/m³ y un coeficiente de potencia c_p de 0.35; bajo estas condiciones, para alcanzar una potencia de 12.15 W se obtuvo un rotor de 3.91 m², conformado por cinco aspas semicilíndricas de 0.50 m de diámetro. En la etapa de evaluación, mediante un sistema embebido con sensores se registró que, a una velocidad de 2.72 m/s, el rotor alcanzó 14 RPM y generó una potencia de 1.12 W. El análisis económico reportó un VAN de -S/. 5021.50, una TIR de -31 % y una relación beneficio-coste de 0.069, por lo que se concluye que el proyecto no es económicamente viable y no se recomienda su implementación a gran escala sin mejoras sustanciales en eficiencia o en las condiciones del recurso eólico.

Palabras clave: potencial eólico, aerogenerador, sistema embebido, prototipo.

ABSTRACT

The limited availability of electric power in areas far from the public grid motivates the assessment of wind energy as an alternative for local energy supply. In this context, the objective of the research was to implement and evaluate a vertical-axis wind turbine prototype designed to operate at low wind speeds in the village of Cruz Grande, district of Jaén. The study was applied in nature, with an experimental design. For the sizing, a wind speed of 2.72 m/s, an air density of 1.09 kg/m³ and a power coefficient c_p of 0.35 were considered; under these conditions, to reach a power of 12.15 W, a rotor area of 3.91 m² was obtained, consisting of five semicylindrical blades with a diameter of 0.50 m. During the evaluation stage, using an embedded system with sensors, it was recorded that at a wind speed of 2.72 m/s the rotor reached 14 RPM and generated an electrical power of 1.12 W. The economic analysis reported an NPV of -S/. 5021.50, an IRR of -31% and a benefit-cost ratio of 0.069, therefore it is concluded that the project is not economically viable and its large-scale implementation is not recommended without substantial improvements in efficiency or in the conditions of the wind resource.

Keywords: wind potential, wind turbine, embedded system, prototype

* Autor para correspondencia

^{1.} Universidad Nacional de Jaén-1, Perú. Email: jingfrans@unj.edu.pe, jefer.sanchez@est.unj.edu.pe, rodohi.palacios@est.unj.edu.pe, lenin_nunez@unj.edu.pe

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, la escasez de energía y el agotamiento de combustibles fósiles han impulsado la adopción de energías renovables, destacando la eólica como una de las más prometedoras. Aunque los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) han liderado grandes proyectos, presentan limitaciones en áreas urbanas y semiurbanas debido al ruido, impacto visual y restricciones de espacio. En contraste, los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) ofrecen menor impacto ambiental, operan con bajas velocidades de viento y se integran fácilmente en entornos urbanos (Li et al., 2016; Yang et al., 2016; Khorsand et al., 2015). Según el Ministerio de Energía y Minas [MINEM] (2016), la energía eólica es una fuente madura y competitiva; sin embargo, los VAWT han sido menos investigados que los HAWT. La crisis climática y la necesidad de micro y nano generación han renovado el interés por ellos, especialmente en zonas aisladas sin acceso a redes eléctricas (Alave-Vargas et al., 2022).

En el caserío Cruz Grande, ante la ausencia de electricidad, surge la propuesta de implementar un prototipo de VAWT para aprovechar las bajas velocidades de viento. Este tipo de equipo es compacto, silencioso y adecuado para zonas rurales. Sus beneficios incluyen: Técnico-científicos: fomento de energías renovables y autoconsumo, validación del funcionamiento real y medición de la potencia generada en distintas velocidades de viento, Económicos: reducción de costos energéticos a largo plazo, menor dependencia de combustibles fósiles, acceso a subsidios, generación de empleo y mejora en la resiliencia energética, Sociales: mejora de calidad de vida, acceso a educación y comunicación, cohesión comunitaria, reducción de migración y concientización ambiental y Ambientales: uso de energía limpia que contribuye al desarrollo sostenible.

Estudios previos respaldan esta iniciativa: Altmimi et al. (2021) hallaron que un rotor de 4 palas supera al de 3 en eficiencia; Potosi (2021) desarrolló un VAWT que genera potencia útil desde 4 m/s; Gómez (2024) diseñó un sistema de monitoreo de turbinas con software libre; Caballero y Gallardo (2022) implementaron un sistema híbrido eólico-solar para una demanda de 4874.8 kWh/año; López (2021) optimizó un prototipo Savonius modificado, aumentando un 159% su eficiencia; y Suárez (2021) evaluó un Savonius para Jaén, concluyendo su baja rentabilidad económica.

El objetivo general de esta investigación es implementar un prototipo de aerogenerador de eje vertical para bajas velocidades de viento en Cruz Grande, Jaén, con el fin de generar energía eléctrica. Los objetivos específicos son: determinar parámetros de diseño, evaluar su funcionamiento y realizar la evaluación económica del proyecto.

MATERIALES Y MÉTODOS

El objeto de estudio fue la implementación de un prototipo de aerogenerador de eje vertical (AEV) diseñado para aprovechar bajas velocidades de viento con el fin de producir energía eléctrica en condiciones rurales. El caso de aplicación se situó en el caserío Cruz Grande, distrito de Jaén, donde el acceso a energía eléctrica presenta limitaciones y el recurso eólico es moderado pero continuo. El prototipo se concibió con fines demostrativos y como base para futuras estrategias de electrificación distribuida en zonas rurales.

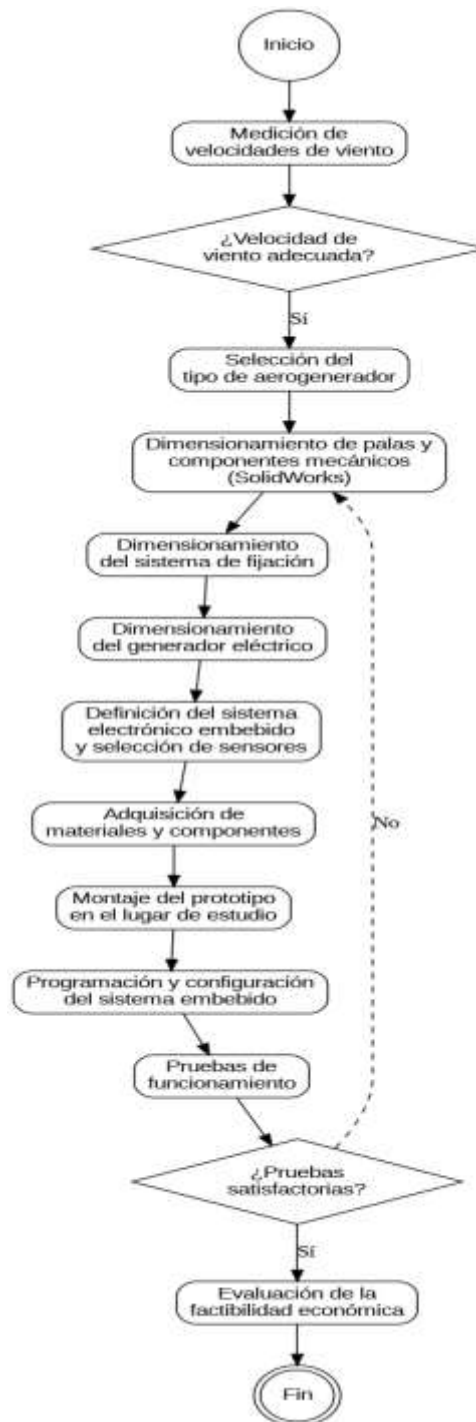
La implementación y prueba del prototipo se llevó a cabo en el caserío Cruz Grande, provincia de Jaén, departamento de Cajamarca (Perú). El emplazamiento seleccionado se localiza en las coordenadas aproximadas -5.722079 de latitud y -78.82066 de longitud, en una zona con relieve ligeramente accidentado y presencia de vientos de baja a media intensidad. El lugar se eligió considerando: (1) disponibilidad de espacio libre de obstáculos para el flujo de viento, (2) cercanía a viviendas potencialmente beneficiarias del sistema y (3) accesibilidad logística para el transporte de materiales, montaje y posterior mantenimiento del prototipo.

En el marco del estudio, la población estadística se definió como el conjunto de valores de velocidad del viento presentes en el área de estudio. Dado que la variable de mayor interés para el diseño del AEV es el régimen eólico local, se tomó como referencia la recomendación de Manwell et al. (2010), que plantean la necesidad de contar con múltiples mediciones para captar la variabilidad del recurso. Se estableció una muestra de 40 mediciones puntuales de velocidad de viento, obtenidas con un anemómetro en el sitio seleccionado, distribuidas a lo largo de un periodo de observación de cuarenta días consecutivos. A partir de este conjunto de datos se calculó la velocidad media del viento, así como parámetros básicos de dispersión (desviación estándar y rango), que se emplearon para, estimar la densidad de potencia eólica disponible en el sitio, dimensionar el rotor y el generador eléctrico del prototipo, verificar la factibilidad técnica de operar el aerogenerador a bajas velocidades de viento. El muestreo fue de tipo no probabilístico por conveniencia, condicionado por la accesibilidad y las condiciones climáticas del caserío.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del procedimiento metodológico seguido para el diseño, construcción y evaluación del aerogenerador de eje vertical. En él se sintetizan de manera secuencial las etapas principales, desde la medición del recurso eólico hasta la evaluación de la factibilidad económica del prototipo.

Figura 1

Diagrama de flujo del procedimiento realizado en la investigación



Nota. La Figura 1 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento metodológico seguido para el desarrollo del prototipo de aerogenerador de eje vertical. El proceso se inicia con la medición de las velocidades de viento en el sitio de estudio y una primera decisión sobre la adecuación del recurso eólico. Cuando la velocidad resulta suficiente, se procede a la selección del tipo de aerogenerador y al dimensionamiento de las palas y componentes mecánicos en SolidWorks, seguido por el dimensionamiento del sistema de fijación y del generador eléctrico.

A continuación, se define el sistema electrónico embebido y se seleccionan los sensores, para luego adquirir los materiales y componentes necesarios.

Posteriormente, se realiza el montaje del prototipo en el lugar de estudio y la programación y configuración del sistema embebido. Una vez ensamblado el sistema, se ejecutan las pruebas de funcionamiento, tras las cuales se toma una segunda decisión: si los resultados no son satisfactorios, el procedimiento retorna al bloque de dimensionamiento mecánico para introducir ajustes; si las pruebas cumplen los criterios establecidos, se pasa a la evaluación de la factibilidad económica del proyecto, con lo que se da por concluido el procedimiento.

Componentes constructivos del aerogenerador

Las aspas del rotor se construyeron con plancha de acero laminado en frío recubierta con Aluzinc AZ150 de 0,35 mm, material elegido por su alta resistencia a la corrosión y a la oxidación, según especificaciones del proveedor (2,68 kg por lámina estándar y 1,20 m de ancho). El eje se fabricó con barra maciza de acero estructural de 1¼", conforme a las normas ASTM A36/A36M y SAE 1045, dimensionada para soportar los esfuerzos de flexión y torsión y protegida con pintura anticorrosiva.

El conjunto se completó con un soporte de eje en tubo redondo de acero y una torre de tubos cuadrados estructurales, diseñada para resistir peso propio, cargas de viento y vibraciones, considerando factores de seguridad frente a pandeo, flexión y fatiga. Como sistema de conversión se empleó un generador de imanes permanentes con bobinados de cobre e imanes de neodimio, capaz de entregar tensiones útiles aun a bajas velocidades de giro, adecuado para sitios con vientos moderados.

Sistema de control y electrónica

El sistema de conversión y control se compuso de tres elementos principales: un controlador de carga, encargado de regular la energía hacia el banco de baterías y protegerlo de sobrecarga y sobredescarga; un banco de baterías, priorizando tecnologías de ion-litio por su mayor densidad energética y vida útil, con la opción de plomo-ácido como alternativa económica; y una placa ESP32, que actuó como unidad central del sistema embebido para registrar velocidad del viento, tensión, corriente y rpm, además de ejecutar la lógica de control del prototipo.

Sistema de montaje y fijación

Para asegurar la estabilidad del aerogenerador se dispuso un sistema de montaje y fijación basado en elementos mecánicos y civiles. Se utilizaron tornillos y pernos de acero inoxidable, seleccionados por su resistencia mecánica y su buen desempeño frente a la corrosión, lo que reduce los requerimientos de mantenimiento. La estructura se ancló a bases de concreto que actúan como

cimientos, proporcionando rigidez al conjunto y garantizando la resistencia frente a esfuerzos de vuelco y deslizamiento producidos por el viento.

Cables, conectores y sensores

Los conductores eléctricos utilizados son de cobre con aislamiento en PVC o polietileno, lo que asegura buena conductividad y protección frente a la radiación solar, la humedad y otros agentes ambientales. Para la monitorización del sistema se emplearon sensores específicos: un transmisor RS485 para la velocidad del viento, un encoder infrarrojo FC-03 para los rpm del eje, el ZMPT101B para la tensión y el ACS712ELCTR-5A-T para la corriente. El registro conjunto de estas variables permitió analizar el desempeño eléctrico del prototipo en condiciones reales de operación.

Instrumentos de medición

En las etapas de construcción, montaje y puesta en marcha se utilizaron diversos instrumentos de medición. Un anemómetro permitió registrar la velocidad del viento en el lugar de instalación. Una pinza amperimétrica se empleó para medir los valores de tensión y corriente del sistema en distintas condiciones de carga. Para la verificación geométrica se utilizaron una cinta métrica (guincha) y un nivel de burbuja, con los que se comprobaron dimensiones, verticalidad y alineamientos de la estructura.

Software de ingeniería

El diseño, análisis y documentación del prototipo se apoyó en diversas herramientas de software con licencia académica o en versión de prueba. El programa AutoCAD 2023 se utilizó para la elaboración de planos y detalles constructivos; SolidWorks 2023 permitió el modelado tridimensional de palas, rotor y estructura; Proteus 8.13 se empleó para la simulación de los circuitos electrónicos y del sistema de control todos estos softwares fueron versión estudiantil; y Arduino IDE 8.3.4 se utilizó para la programación de la placa ESP32.

Máquinas y herramientas de construcción

La fabricación del prototipo se llevó a cabo en un taller metal mecánico equipado con maquinaria convencional. Se utilizó una amoladora angular (Dewalt DWE4324N) para operaciones de corte y desbaste, una sierra de arco (SABI SM-18) para cortes precisos en perfiles metálicos y un taladro percutor-atornillador (Bosch GSB16RE) para la perforación y el ensamblaje mecánico. Las uniones soldadas se realizaron con una soldadora eléctrica (ESAB LHN240IPLUS), y el corte de secciones de acero estructural se efectuó mediante una tronadora (Dewalt D28730). El proceso de pintado se apoyó en una compresora de aire (Einhell TC-AC112508). Adicionalmente, se utilizaron herramientas auxiliares, como pelacables y escobillas

metálicas, para el acabado de soldaduras, la preparación de superficies y el acondicionamiento de conductores eléctricos.

El estudio se enmarca dentro de la categoría de investigación aplicada, puesto que se recurre a conocimientos de diseño de máquinas y de sistemas de conversión energética para dar respuesta a un problema concreto: el aprovechamiento del recurso eólico en una zona rural con limitaciones de acceso a la red eléctrica. En esta perspectiva, la investigación no se orienta únicamente a generar nuevos conocimientos teóricos, sino a desarrollar una solución tecnológica funcional que pueda ser implementada en condiciones reales de operación, coherente con la definición de investigación aplicada planteada por Vásquez et al. (2023), quienes la vinculan con la formulación de respuestas prácticas a partir de bases científicas consolidadas.

En cuanto al diseño, la investigación adoptó un enfoque experimental. Se procedió a la construcción de un prototipo físico de aerogenerador de eje vertical y a la evaluación de su desempeño bajo condiciones controladas de operación en el campo. El comportamiento del sistema se analizó en función de variables técnicas previamente definidas (velocidad de viento, potencia generada, comportamiento eléctrico y respuesta estructural), contrastando los resultados obtenidos con los criterios de diseño y con el desempeño reportado en la literatura para aerogeneradores de características similares. De acuerdo con Cevallos et al. (2017), el diseño experimental se caracteriza por la manipulación deliberada de variables técnicas dentro de rangos establecidos, con el propósito de estudiar su efecto sobre variables de respuesta; en este caso, se consideraron como salidas principales la potencia eléctrica producida y los indicadores económicos asociados a la viabilidad del sistema.

Se desarrolló un análisis documental exhaustivo, basado en una revisión sistemática de literatura en bases de datos científicas (ScienceDirect, SciELO, PubMed), libros especializados, tesis y documentos técnicos de organismos oficiales. Este proceso permitió identificar criterios y parámetros de diseño para aerogeneradores de eje vertical, experiencias en el aprovechamiento de vientos de baja velocidad y metodologías para la evaluación técnica y económica. La información obtenida sirvió como base para definir los rangos de operación del prototipo, dimensionar el rotor y el generador, seleccionar materiales y equipamiento electrónico, y estructurar el esquema de análisis económico.

Además, se aplicó observación directa con mediciones de campo para caracterizar el recurso eólico en el lugar de instalación. Mediante un anemómetro se registró la velocidad del viento durante 40 días consecutivos, siguiendo un protocolo fijo de altura y horarios. Los datos fueron procesados en hojas de cálculo para obtener la velocidad media y otros indicadores

estadísticos, a partir de los cuales se estimó la potencia eólica disponible y se verificó la factibilidad técnica del sistema, ajustando el dimensionamiento del aerogenerador y sirviendo de referencia para interpretar su desempeño energético.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos durante la construcción y evaluación del prototipo de aerogenerador de eje vertical. En primer lugar, se muestran los parámetros técnicos logrados en el diseño y la puesta en marcha del sistema. A continuación, se analizan el comportamiento aerodinámico y eléctrico del prototipo bajo distintas condiciones de velocidad de viento, así como los indicadores de desempeño energético y económico asociados a su operación en el caserío de estudio.

Determinación de los parámetros de diseño de un prototipo de aerogenerador de eje vertical

1. Densidad del viento: $\rho = 1.09 \text{ kg/m}^3$
2. Velocidad del viento: $V_{media} = 2.72 \text{ m/s}$
3. Potencia eléctrica de salida: $P_{carga} = 12.15 \text{ W}$
4. Dimensionamiento del prototipo del aerogenerador:

Para calcular las dimensiones del rotor se utilizó la fórmula $P_{electrica} = \frac{1}{2} \cdot n_e \cdot n_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$, considerando un $C_p = 0.35$ se obtiene un área de barrido del rotor de 3.91 m^2 con 5 aspas semicilíndricas distribuidas en partes iguales alrededor del eje. Entonces:

- Diámetro: $d = 1.60 \text{ m}$; Altura: $h = 2.45 \text{ m}$
- Aspa del rotor: Cada aspa es de 50 cm de diámetro por 2.45 m de altura haciendo una masa teórica de 9.236 kg.
- Velocidad de rotación y torque: $\omega = 3.40 \text{ rad/s}$ y $T = 8.85 \text{ N.m}$
- Fuerza del viento en las aspas: $P = 78.48 \text{ Pa}$
- Fuerza producida en las aspas debido a la rotación: $F = 59.79 \text{ N}$
- Trasmisión mecánica multiplicadora de RPM: $d_{polea \text{ generador}} = 2''$ y $d_{polea \text{ rotor}} = 12''$
- Selección del generador Eléctrico

Tabla 1

Especificaciones técnicas del generador eléctrico

Modelo	G-200,3Ø
Potencia nominal	1000 W
Velocidad nominal de rotación	300 rpm
Voltaje nominal	100 V
Corriente nominal	10A
Eficiencia	0.90
Material	Imanes permanentes
Peso	8 kg

Nota. Dimensionamiento de baterías: Batería Bulk (modelo: BK NS60L) de 9 Ah. El prototipo de aerogenerador de eje vertical fue dimensionado bajo condiciones de operación representativas del sitio, considerando una densidad del aire de 1,09 kg/m³ y una potencia eléctrica ideal estimada de 12,15 W para la condición de diseño.

Según la tabla 1, para la conversión electro–mecánica se seleccionó un generador de imanes permanentes modelo G-200,3Ø, con potencia nominal de 1000 W, velocidad nominal de 300 rpm, voltaje nominal de 100 V, corriente nominal de 10 A y eficiencia de 0,90

5. Diseño de las partes del aerogenerador

- **Aspas:** Se seleccionó Aluzinc de 0.35 mm de espesor para la construcción, pero estas resultan ser flexibles por lo que se diseñó un soporte de acero estructural para cada una de estas rolado exactamente a 50 cm de diámetro.
- **Eje:** Se seleccionó un eje de 1 ¼”, haciendo mecanizar un orificio roscado en la parte superior para fijar la brida. Además, se tornearon los extremos del eje con el fin de acoplar adecuadamente chumaceras de 1”.
- **Soporte de eje(carrete):** Soporta el eje y su conjunto a través de 2 chumaceras para evitar la flexión, y transmitir la carga hacia la torre. Se seleccionó tubo de acero estructural circular de 2.5 pulgadas soldado con bridas circulares en ambos extremos para la fijación en la torre
- **Brida:** Une las aspas con el eje a través de pernos para formar un conjunto estable y seguro, para ello se realizó 10 agujeros donde irán los pernos de unión del aspa, un agujero central y se soldó una nuez de sujeción para fijar la brida en el eje.
- **Estructura de soporte (torre):** Se construyó una torre de 6 m de altura de tubo cuadrado estructural unida con peldaños soldados a las dimensiones requeridas para lograr estabilidad a lo largo de la estructura.

6. Sistema de control

El sistema de adquisición y monitoreo está conformado por un sensor de viento RS485 para medir la variabilidad de la velocidad del viento, un sensor de RPM tipo encoder infrarrojo FC-03 (MOCH22A) para cuantificar las revoluciones del eje del generador, un sensor de voltaje ZMPT101B para registrar el voltaje de línea y un sensor de corriente ACS712ELCTR-5A-T (5 A) para medir la corriente entregada a la carga; además, incorpora un módulo RTC DS3221 por I2C para asociar cada registro con fecha y hora, y un módulo lector microSD (74LVC125A) para almacenar las mediciones. Todo el procesamiento y la gestión de datos se realizan con un ESP32 DEVKIT V1, mientras que la visualización en tiempo real se efectúa mediante un display LCD TFT de 2.4" con interfaz I2C, permitiendo supervisar las variables eléctricas y mecánicas del sistema durante la operación.

7. Evaluación del funcionamiento del aerogenerador

Para la respectiva evaluación del aerogenerador se realizó la implementación del prototipo. Las aspas se construyeron de Aluzinc de 0.35 mm de espesor y se fijó a través de remaches en la estructura de soporte para evitar la flexión. Luego se procedió a realizar el torneado del eje para fijar con las chumaceras hacia el carrete y este en la torre. Seguidamente se realizó el montaje de la brida con el eje con sus respectivos prisioneros, y finalmente se realizó el montaje de las aspas con sus respectivos pernos en la brida.

Figura 2

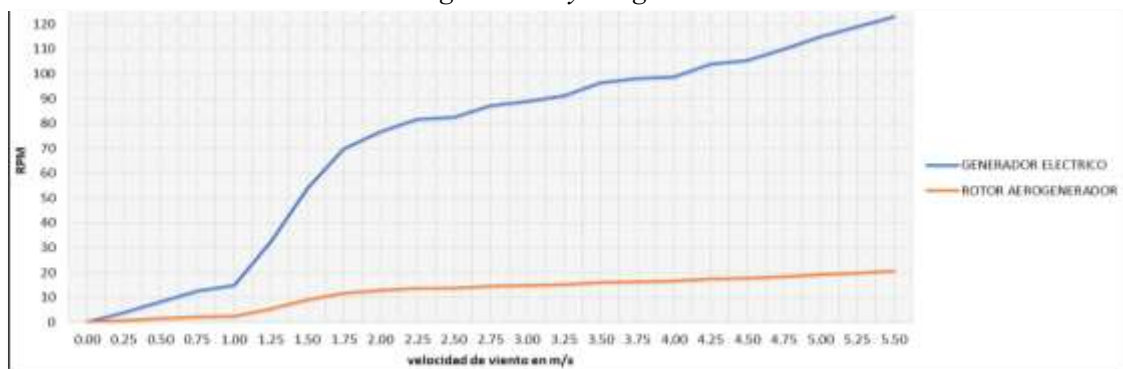
Prototipo de aerogenerador de eje vertical



Nota. Según la figura 2, el prototipo fue construido e instalado con aspas de aluzinc de 0,35 mm reforzadas con soportes de acero estructural; se montó el conjunto eje–chumaceras–carrete, la brida de unión y la torre de 6 m de altura, asegurando rigidez y estabilidad del sistema durante operación. El monitoreo se realizó mediante un sistema embebido durante 5 días, registrando datos cada 30 s y almacenándolos en tarjeta micro-SD para su posterior procesamiento en Excel. La instrumentación incluyó sensor de viento RS485, sensor de RPM (FC-03), sensor de voltaje (ZMPT101B) y

Figura 3

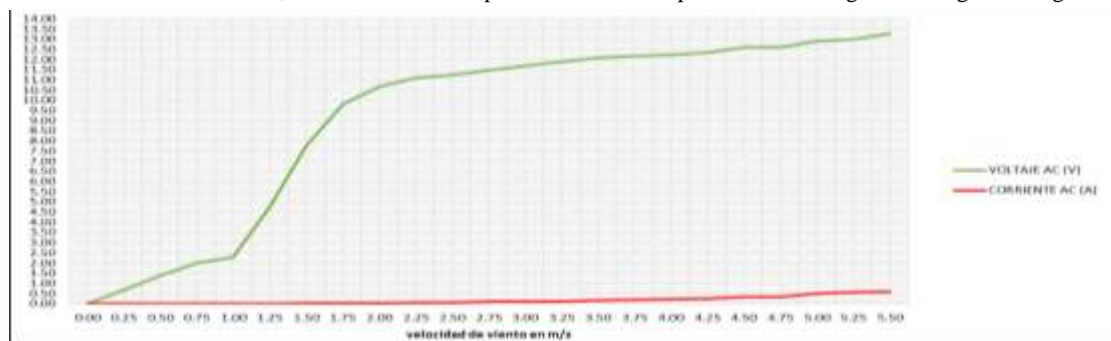
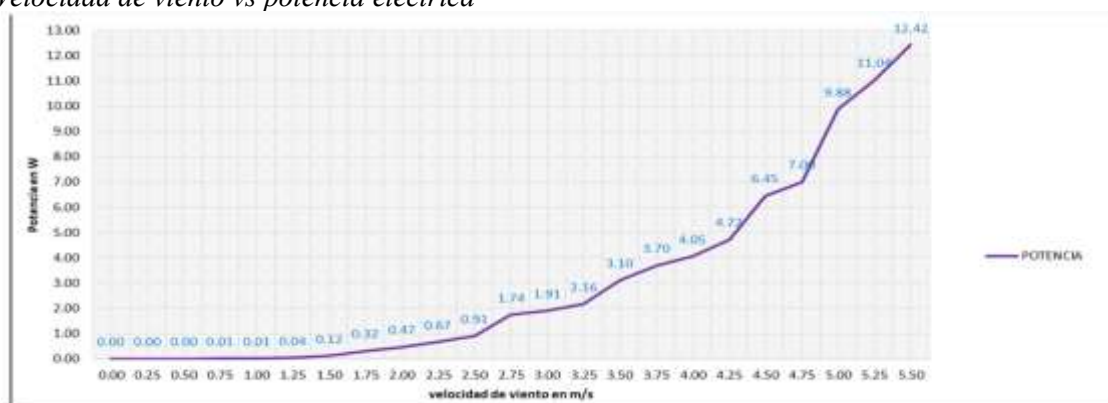
Velocidad del viento vs RPM del aerogenerador y del generador eléctrico



Nota. Según la figura 3, se observó un incremento de las RPM del rotor conforme aumentó la velocidad del viento. Adicionalmente, el generador presentó un aumento más pronunciado de revoluciones debido a la relación de transmisión 1:6. Respecto a la condición de diseño, se estimó que a 2,72 m/s el rotor alcanzaría 32 RPM; sin embargo, en la evaluación experimental a dicha velocidad se registró aproximadamente 14 RPM, evidenciando una diferencia entre el desempeño ideal y el real bajo condiciones de campo.

Figura 4*Velocidad del viento vs voltaje e intensidad de corriente*

Nota. Según la figura 4, el voltaje y la corriente medidos bajo carga mostraron una tendencia creciente con el incremento de la velocidad del viento, indicando una respuesta eléctrica dependiente del régimen de giro del generador.

**Figura 5***Velocidad de viento vs potencia eléctrica*

Nota. Según la figura 5, la potencia eléctrica medida aumentó con la velocidad del viento (Figura 5). A 2,72 m/s se obtuvo 1,74 W, lo que representa una reducción del 85% respecto a la potencia ideal estimada (12,15 W). Durante el periodo de monitoreo, la potencia promedio fue 0,12 W, asociada a una velocidad promedio de viento de 1,54 m/s, lo cual explica el bajo rendimiento observado en condiciones reales de bajas velocidades.

Tabla 2*Estadística descriptiva de las variables medidas en función de la velocidad del viento*

Variable	Unidad	n	Media	DE	Min	Max
Velocidad del viento	m/s	23	2.75	1.70	0.00	5.50
RPM rotor	rpm	23	12.34	7.13	0.00	20.54
RPM generador	rpm	23	74.82	41.94	0.54	123.24
Voltaje AC	V	23	9.38	4.84	0.07	13.37
Corriente AC	A	23	0.11	0.18	0.00	0.58
Potencia	W	23	2.59	3.45	0.00	12.42

Nota. La Tabla 2 presenta la estadística descriptiva de las variables evaluadas en las curvas experimentales en función de la velocidad del viento. Se incluye el número de puntos considerados ($n = 23$), así como la media, desviación estándar (DE) y los valores mínimo y máximo de cada variable (velocidad del viento, RPM del rotor, RPM del generador, voltaje AC, corriente AC y potencia). En el rango analizado (0,00–5,50 m/s), la velocidad media fue 2,75 m/s y se observó un incremento del régimen de giro y de la respuesta eléctrica conforme aumenta el viento, alcanzándose valores máximos de 20,54 rpm en el rotor, 123,24 rpm en el generador, 13,37 V de voltaje, 0,58 A de corriente y 12,42 W de potencia. La dispersión cuantificada por la DE refleja la variabilidad de la respuesta del sistema a lo largo del rango de velocidades evaluado.

Evaluación económica del proyecto.

La inversión total ascendió a S/ 5027,96 y el ingreso anual estimado fue S/ 0,865. Los indicadores obtenidos fueron VAN = -S/ 5021,50, TIR = -31% y relación Beneficio/Costo = 0,069, lo que evidencia inviabilidad económica bajo el escenario de operación evaluado.

DISCUSIÓN

La presente sección discute los resultados obtenidos en el diseño, construcción y evaluación del aerogenerador de eje vertical, contrastándolos con la evidencia reportada en investigaciones previas.

López (2021) desarrolló un estudio experimental para optimizar la captación de energía eólica con prototipos Savonius, comparando una turbina clásica de dos etapas y un diseño modificado de una sola etapa con cuatro álabes semicilíndricos, ensayados entre 2.9 y 4.8 m/s. El diseño modificado mostró un mejor desempeño, por lo que en el presente trabajo se adoptaron palas semicilíndricas, fabricadas en Aluzinc por su resistencia a la corrosión y bajo peso. El prototipo se dimensionó considerando una densidad del aire de 1.09 kg/m^3 y una velocidad media de viento de 2.72 m/s, obteniéndose un área de barrido de 3.91 m^2 y una potencia ideal proyectada de 12.15 W.

Altmimi et al. (2021) compararon rotores de eje horizontal con distinto número de palas, encontrando que configuraciones de 4 y 5 palas eran más eficientes que el clásico rotor de 3, aunque el de 5 palas fallaba a TSR elevados. A partir de estos resultados, se diseñó un rotor de 1.60 m de diámetro, cinco palas semicilíndricas de radio 0.25 m y altura de 2.45 m, priorizando mayor torque de arranque a vientos moderados. Se obtuvo un torque de $8.85 \text{ N}\cdot\text{m}$ y 32 rpm en condiciones iniciales, incorporándose un sistema de transmisión por poleas para aumentar la velocidad de giro del generador. No obstante, se observaron pérdidas mecánicas y dificultades de arranque a bajas velocidades, lo que refuerza la necesidad de generadores diseñados para operar directamente a bajas rpm y alto torque, en línea con Potosí (2021), quien logró eficiencias cercanas al 59 % con un generador axial adaptado al potencial eólico disponible.

En la instrumentación, se implementó un sistema embebido con sensores RS485 para la velocidad del viento, encoder FC-03 para rpm, módulo ZMPT101B para tensión y ACS712ELCTR-5A-T para corriente, gestionados por dos ESP32 y un módulo microSD para registro de datos cada 30 segundos durante 5 días, además de una pantalla LCD táctil de 2.4". Esta estrategia, inspirada en la propuesta de Gómez (2024), permitió un monitoreo continuo y preciso

con tecnología accesible y de código abierto, superando las limitaciones de métodos manuales tradicionales en términos de precisión y tiempo de procesamiento.

Durante la evaluación experimental, a una velocidad media de 2.72 m/s se obtuvo una potencia real de 1.74 W, aproximadamente un 85 % por debajo de la potencia ideal, evidenciando pérdidas importantes en el sistema mecánico y eléctrico. El multiplicador por poleas (1:6) ligeramente incrementó la velocidad de entrada al generador, pero introdujo pérdidas adicionales y un par resistente significativo, limitando el arranque y la operación. Estos resultados confirman que, en contextos de viento bajo, la solución más eficiente es emplear generadores específicamente diseñados para bajas revoluciones, evitando multiplicadores que incrementen la inercia y las pérdidas.

Caballero y Gallardo (2022) mostraron que un sistema híbrido eólico–solar permite cubrir demandas energéticas relevantes (4874.8 kWh/año) con un aerogenerador Darrieus de 3.5 kW operando a 12.7 m/s y paneles fotovoltaicos complementarios. En contraste, en el presente estudio la velocidad media del viento de 1.54 m/s solo permitió generar alrededor de 0.12 W, muy por debajo de los 12.15 W mínimos para iniciar la carga de baterías, lo que evidencia la baja eficacia de un sistema exclusivamente eólico en estas condiciones. En coherencia con Suárez (2021), quien reportó indicadores económicos negativos (VAN, TIR, B/C) para un sistema similar en Jaén con vientos promedios de 1.03 m/s, la evaluación financiera de este proyecto también arrojó VAN y TIR negativos, confirmando su no viabilidad económica bajo el régimen de viento estudiado. Estos hallazgos, en línea con lo planteado por Duffie y Beckman (2013), subrayan que en escenarios de baja disponibilidad eólica resulta más adecuado considerar soluciones híbridas (eólico–solar) u otras fuentes renovables que permitan mejorar tanto el rendimiento energético como la viabilidad económica del sistema.

CONCLUSIONES

La implementación del sistema embebido de adquisición de datos permitió una medición precisa, continua y en tiempo real de las variables críticas del prototipo, superando ampliamente a los métodos manuales tradicionales. El uso de sensores especializados, almacenamiento digital y visualización en pantalla táctil demostró ser una solución accesible, escalable y eficaz para el monitoreo de sistemas eólicos a pequeña escala.

A partir de una densidad del aire de 1.09 kg/m³ y una velocidad media de viento de 2.72 m/s se estimó una potencia teórica de 12.15 W, definiéndose un rotor de 1.60 m de diámetro, 2.45 m de altura y un torque de diseño de 8.85 N·m. Sin embargo, la potencia real obtenida fue

significativamente menor, debido a pérdidas mecánicas y eléctricas, en especial las asociadas al sistema de transmisión por poleas y al par resistente de la carga.

Los resultados muestran que la estrategia más eficiente para mejorar el rendimiento del sistema consiste en emplear un generador diseñado para operar directamente a bajas revoluciones y alto torque, prescindiendo de multiplicadores mecánicos que incrementan la inercia y las pérdidas.

En el contexto de bajas velocidades de viento del sitio de estudio, un sistema exclusivamente eólico no logra cubrir las necesidades energéticas planteadas. La evaluación económica arrojó un VAN y una TIR negativos, lo que confirma la no viabilidad financiera del proyecto en estas condiciones y refuerza la conveniencia de considerar soluciones híbridas (eólico-solar) u otras fuentes renovables complementarias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alave-Vargas, E. M., Lafuente, R. O., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical (Monografía). *Revista Investigación & Desarrollo*, 22(1), Article 1. <https://doi.org/10.23881/idupbo.022.1-13i>
- Altmimi, A., Alaskari, M., Abdullah, O., & Sherza, J. (2021). Diseño y optimización de aerogeneradores de eje vertical utilizando QBlade. *Applied System Innovation*, 4(4), 74. <https://doi.org/10.3390/asi4040074>
- Caballero, R. J., & Gallardo, R. J. (2022). *Aerogenerador hibrido de eje vertical para abastecer de energía eléctrica al laboratorio general de Biotecnología de la UNPRG* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10760>
- Cevallos, A. F., Polo Luna, E. F., Salgado Chasipanta, D. J., & Orbea Vergara, M. S. (2017). *Métodos y técnicas de investigación*. Grupo compás. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/498>
- Gómez, C. A. (2024). *Prototipado y análisis comparativo de dos turbinas eólicas de eje vertical para generación eléctrica a pequeña escala* [Tesis de postgrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio Institucional UTP. <https://hdl.handle.net/11059/15277>
- Jimenez, F., Espinosa, C., & Fonseca, L. (2007). *Ingeniería Económica*. Editorial Tecnologica de CR. https://www.google.com.pe/books/edition/Ingenier%C3%ADa_Econ%C3%B3mica/LVLZA74NNwwC?hl=es&gbpv=0
- Khorsand, I., Kormos, C., MacDonald, E. G., & Crawford, C. (2015). Wind energy in the city: An interurban comparison of social acceptance of wind energy projects. *Energy Research & Social Science*, 8, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.04.008>

- López, E. J. (2021). *Construcción de prototipo de aerogenerador savonius a nivel de banco para optimizar captación de energía eólica* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional UNJFSC. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5469>
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2016). *Atlas eólico del Perú*. [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Electricidad/publicaciones/Atlas Eolico Final.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Electricidad/publicaciones/Atlas_Eolico_Final.pdf)
- Potosi, F. L. (2021). *Construcción de un prototipo de generador eólico de baja potencia con eje vertical en el edificio de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Institucional UTN. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11555>
- Suárez, N. J. M. (2021). *Diseño de un Aerogenerador Eólico para Cubrir la Demanda Eléctrica al Laboratorio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio Institucional UNJ. <http://repositorio.unj.edu.pe/jspui/handle/UNJ/162>
- Vásquez, A. A. V., Guanuchi, L. M., Cahuana, R. C., Vera, R. V., & Holgado, J. H. (2023). Métodos de investigación científica. En *Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.094>
- Villarrubia, M. (2012). *Ingeniería de la energía eólica* (1 edición). Marcombo. https://books.google.com.pe/books?id=GW_jEgJJSdcC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false