

Influencia de la relación de velocidad periférica en el coeficiente de potencia en una turbina de eje vertical tipo Savonius

Influence of the peripheral speed ratio on the power coefficient in a Savonius type vertical axis turbine

Rodrigo Alberto Torres Zeballos

torresproducer1@outlook.com

<https://orcid.org/0009-0006-7261-1048>

Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú

Nilton Juan Zeballos Hurtado

nzeballos@ujcm.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-7057-1015>

Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú

Recibido 15-01-2024 | Arbitraje: 28-04-2024 | Aceptado: 30-05-2024 | Publicado: 28-06-2024

RESUMEN

Palabras clave:

Energía renovable;
Prototipo turbina; Rotor;
Savonius

El estudio tiene como objetivo determinar el nivel de influencia de la relación de velocidad periférica de las turbinas de eje vertical tipo Savonius en el coeficiente de potencia. El método es investigación experimental de nivel tecnológica, donde se elaboró un prototipo, a partir del cual se tomaron 6 muestras (valores de la relación de velocidad periférica del rotor). En los resultados se observa una baja eficiencia en el aprovechamiento de la potencia disponible y limitaciones en la capacidad de alcanzar altas velocidades de rotación, donde el coeficiente de potencia alcanzado fue $C_p=0.073$ y velocidad periférica (TSR) de $\lambda=0.43$. Se concluye, que el incremento de la relación de velocidad periférica en turbinas de eje vertical tipo Savonius provoca elevados valores en el coeficiente de potencia, respaldado por una correlación positiva muy alta ($r=0.984$ y $p=0.000$) entre velocidad periférica en turbina tipo Savonius y coeficiente de potencia.

ABSTRACT

Keywords:

Renewable energy; Turbine
prototype; Rotor; Savonius

The study aims to determine the level of influence of the peripheral speed ratio of Savonius type vertical axis turbines on the power coefficient. The method is experimental research at a technological level, where a prototype was developed, from which 6 samples were taken (values of the rotor peripheral speed ratio). The results show a low efficiency in the use of available power and limitations in the ability to reach high rotation speeds, where the power coefficient achieved was $C_p=0.073$ and peripheral speed (TSR) of $\lambda=0.43$. It is concluded that the increase in the peripheral speed ratio in Savonius type vertical axis turbines causes high values in the power coefficient, supported by a very high positive correlation ($r=0.984$ and $p=0.000$) between peripheral speed in Savonius type turbine and power coefficient.



INTRODUCCIÓN

Mejorar el coeficiente de potencia en una turbina eólica es fundamental para aumentar la eficiencia de la conversión de energía cinética del viento en energía eléctrica utilizable. El coeficiente de potencia [CP] es una medida que indica qué parte de la energía cinética del viento incide sobre la turbina se convierte en energía eléctrica. Un CP más alto significa una mayor eficiencia en la conversión de energía, y esto es importante por varias razones, como el aumento de la producción de energía el cual nos indica que un CP más alto permite que la turbina extraiga más energía del viento, lo que se traduce en una mayor producción de energía eléctrica. Esto es crucial para hacer que la energía eólica sea más rentable y competitiva en comparación con otras fuentes de energía. La reducción de costos al mejorar la eficiencia de conversión, se puede generar más energía con la misma cantidad de viento, lo que reduce los costos de generación de energía por kilovatio-hora producida. Esto es importante para la viabilidad económica de la energía eólica. Asimismo, el aprovechamiento de recursos al aumentar el CP significa que las turbinas pueden funcionar eficazmente en una variedad más amplia de velocidades de viento. Esto permite aprovechar mejor los recursos eólicos disponibles en una ubicación determinada, ya que las condiciones del viento pueden variar ampliamente. También tendremos menor impacto ambiental ya que al aumentar la eficiencia de conversión, se necesita menos infraestructura y menos turbinas para generar la misma cantidad de energía, lo que reduce el impacto ambiental y la huella de carbono. Otra razón se encuentra en la mayor competitividad en el mercado ya que con un CP más alto, la energía eólica puede competir mejor en el mercado de la energía eléctrica, lo que puede llevar a una mayor inversión en proyectos eólicos y una transición más rápida hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Se han realizados estudios previos del tema que sirven como antecedentes, así tenemos: el estudio de Alave-Vargas et al. (2022), sobre aerogeneradores

de eje vertical (VAWT) tiene el objetivo aumentar su eficiencia y diversificar sus aplicaciones. El coeficiente de potencia (C_p) y el índice de velocidad (TSR) se utilizan para medir la eficiencia de los aerogeneradores. El TSR es fundamental para determinar cuándo un aerogenerador puede funcionar y puede variar dependiendo de su diseño. Un TSR superior a 6 se recomienda, pero depende del tipo de aerogenerador. Además, el TSR puede tener efectos mecánicos significativos. Osinergmin (2017) refiere que, claramente, se puede observar que el viento necesita alcanzar una velocidad mínima para poner en movimiento las palas de la turbina eólica. Sin embargo, también existe un límite superior importante a considerar: incluso si la máquina está generando su máxima potencia, si la velocidad del viento excede las especificaciones del aerogenerador, se requiere desconectarlo de la red o ajustar la orientación de las palas para evitar daños en su estructura debido a las tensiones en el eje. Esto resulta en una disminución significativa de la producción de energía eléctrica, a pesar de la disponibilidad de viento, lo que plantea dudas sobre cómo aprovechar eficazmente esta energía en la red eléctrica de consumo.

En el ámbito local, Región Moquegua, donde se localiza el proyecto, todavía no se ha aprovechado plenamente el potencial de la energía eólica debido a la falta de interés de las autoridades en promover el desarrollo de este tipo de energía renovable, por lo mismo, nos planteamos realizar esta investigación, para establecer el nivel de influencia de la relación de velocidad periférica de las turbinas de eje vertical tipo Savonius en el coeficiente de potencia Moquegua.

El incremento de la relación de velocidad periférica en turbinas de eje vertical tipo Savonius provoca elevados valores en el coeficiente de potencia, Moquegua, 2023.

Marco teórico

Entre los trabajos de investigación internacionales, se ha considerado a Torres (2021) que tuvo como objetivo desarrollar un diseño aerodinámico para una turbina eólica Savonius

de eje vertical a fin de optimizar el coeficiente de potencia de un modelo paramétrico de cuatro variables geométricas. Para lograrlo, realizó el modelamiento paramétrico utilizando un software de diseño y dinámica de fluidos. Para evaluar las simulaciones, previamente determinó la magnitud de las variables geométricas que permitan maximizar el rendimiento y analizó el compartimiento de la turbina en función de las condiciones meteorológicas durante el periodo de estudio y determinó la magnitud de las variables geométricas que permiten maximizar el rendimiento. Con base en sus resultados, validó la metodología de diseño aerodinámico para una SVAWT, donde se maximizó el rendimiento aerodinámico y la potencia eléctrica proporcionada por el generador que lleva acoplado. Estos resultados se obtuvieron mediante modelamiento paramétrico de geometría en 3D que consideró las variables geométricas AR, OR, TA y la cantidad de álabes, basándose en investigaciones previas que tenían alta confiabilidad, respaldados por R2 de 0.93, lo que conllevó la reducción de tiempo y costo, también se optimizó el desempeño aerodinámico mediante la determinación de las magnitudes de cada variable, donde se consideró AR de 8.38, OR de 0.08, TA de 174.05° y 2 álabes, habiendo obtenido el $C_{p,max}$ (0.21 para una V_o de 12 m/s), donde la potencia promedio disponible del viento es de 1 m² que dan 3.64W, y obtuvo un incremento del 2.28% sobre el valor nominal que generaba 160W, asimismo, demostró que en tres meses del año fue posible la generación de 150kWh/mes que equivalen al 8.90%, 6.26% y 12.25%. Patricio (2021) tuvo como propósito simular numéricamente el comportamiento de una turbina eólica de eje vertical utilizando condiciones de viento reales en la República Mexicana, optando por recopilar información en una región geográfica en la que se den situaciones de alta velocidad del viento y la presencia de áreas no electrificadas, ubicadas en el interior de México. Para próximamente elegir un rotor de geometría optimizada, con el fin de aprovechar sus ventajas aerodinámicas en cuanto a generación de par motor y potencia. A su vez,

se obtienen resultados numéricos cuyo valor en relación con los datos experimentales permite una extrapolación del comportamiento de la turbina a regiones de operación que el análisis experimental de la fuente no tomó en cuenta. Para generalizar su comportamiento a varios tamaños de rotor diferentes al tamaño analizado; primero analizó el desempeño de la turbina en forma adimensional utilizando los coeficientes de momento (C_m), potencia (C_p) y razón de velocidad en punta (λ). Para lograrlo, detalla que primero se recopilan datos sobre la velocidad del viento en el Golfo de Tehuantepec. Estos datos se emplearon como un valor promedio para determinar la velocidad a la cual se realizó el análisis. Las condiciones en las que se llevó el análisis incluyen aspectos como las condiciones de frontera, la consideración de la incompresibilidad en el flujo, el algoritmo de resolución y los valores de referencia utilizados en el cálculo del coeficiente de momento (C_m). Según los resultados que obtuvo, revela que, dado que el valor calculado de $C_p=0.217$ a $\gamma = 0.65$ y el valor experimental de $C_p=0.21$ a $\gamma = 0.69$, logró emular de manera efectiva el comportamiento experimental del rotor en la región donde la potencia de salida es máxima. Además, observó que el comportamiento de las variables, como el coeficiente de momento, la presión, la velocidad y la intensidad de la turbulencia, concordó con los fenómenos físicos esperados en el rotor.

Por último, consideró un error porcentual absoluto medio del 13.13% en el trabajo, lo que representa un primer paso hacia la estandarización del margen de error aceptable en el estudio de un rotor Savonius. Asimismo, plantea como una propuesta para futuras investigaciones la determinación efectiva de este margen mediante una serie de análisis experimentales, en conjunto con sus respectivas simulaciones computacionales.

A nivel nacional en Perú, Bacilio y Inuma (2020), se centró en diseñar y simular un generador eólico múltiple de eje vertical utilizando el software SolidWorks para generar energía eléctrica; Desarrolló un prototipo de generador eólico y luego se realizó una simulación del prototipo

en tres versiones diferentes. Con base en sus resultados, descubrió que el área total de barrido de los rotores del generador es de 1.0192 m², y también calculó la densidad de potencia mensual para calcular la energía mensual productiva. Mediante el complemento de Simulación del programa de SolidWorks, se determinó también la tensión, el desplazamiento y la deformación de los alabes del rotor por la presión dinámica del viento mediante un estudio de estática. Los resultados fueron 1.986x10⁵ N/m², 1.601x10⁻¹ mm y 4.050x10⁻⁵ respectivamente. Se llevó a cabo un análisis de la estática de las bases que sostienen el generador mediante el peso del rotor (150.136 N) y la presión del aire (977.2405 Pa). Para cada modificación, se encontró que la modificación 1 fue la más óptima. El peso del rotor incluye una tensión máxima de 1.602x10⁵ N/m²; un desplazamiento de 4.936x10⁻³mm; una deformación de 1.945x10⁻⁶, y una tensión mínima de 1.386x10⁴ N/m²; un desplazamiento de 4.751x10⁻⁴mm; y una deformación de 1.740x10⁻⁷. Por lo tanto, se determinó la energía anual producida utilizando el complemento de simulación de flujo de SolidWorks; la modificación 1 dio un mejor resultado de 1.7193 kilovatios hora anuales. El estudio de López(2021), tuvo por objetivo maximizar la captación de energía eólica con el prototipo de aerogenerador SAVONIUS. Para ello, especifica el rango de velocidad de viento de operación, determina el coeficiente de potencia (C_p) del prototipo de aerogenerador SAVONIUS y proyecta el ahorro de CO₂. Los hallazgos confirmaron la efectividad de la metodología, que utiliza el escalamiento de la turbina de aerogenerador Savonius, el acondicionamiento para el proceso de evaluación (modelamiento), la recopilación de datos, la determinación de dimensiones y la fabricación y ensamblaje de componentes de acuerdo con las especificaciones de diseño. Después de analizar los datos recopilados durante la evaluación, se descubrió que en comparación con los álabes de un generador SAVONIUS tradicional, el Prototipo C mostró un aumento del 159 % en la eficiencia de captación de energía cinética del viento.

Se encontró que la velocidad de viento del prototipo oscila entre 2,5 m/s y más, lo que fue crucial para elegir un lugar para llevar a cabo la simulación matemática. El coeficiente de potencia del modelo es de 0,23. importante información para poder llevar a cabo la simulación matemática de la producción de energía de un parque eólico. Finalmente, mediante la simulación matemática del prototipo C con 2 etapas a una escala x10 en las coordenadas 227085 E, 8751618 S, ZONA 18 S que presentan características de viento y tomando como referencia la producción de energía eléctrica y la generación de CO₂ de la Central Termoeléctrica, llegando a la conclusión de que se puede ahorrar (dejar de generar) 254 689 TM de CO₂ por año. Berna (2020) investiga para proponer un diseño de un aerogenerador vertical Savonius para la ciudad de Tanaka, con el fin de proveer energía eléctrica a la zona; determinando el diseño y calculando la cantidad de energía producida por el aerogenerador vertical Savonius para la zona de Tanaka. En relación con los resultados obtenidos, los cálculos iniciales indicaron que un rotor de dimensiones bastante amplias (con un radio de 7,9 metros) generaría 8kW de potencia. Sin embargo, una vez que el aerogenerador esté ensamblado, esta dimensión podría disminuir considerablemente. Esto se debe a que el generador eólico requiere una caja de transmisión de energía, que puede aumentar significativamente la cantidad de energía generada y permitir una reducción significativa en el tamaño del generador.

El estudio efectuado por Suárez (2021) el objetivo es diseñar un aerogenerador eólico para satisfacer la necesidad de energía del laboratorio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén. Para ello, analizó la velocidad del viento en la región y luego se determinó la cantidad de energía requerida por el laboratorio. Utilizó el método Weibull para evaluar la velocidad del viento en el área del proyecto, lo que dio como resultado una velocidad de 1,03 m/s durante todo un año. Para diseñar e implementar un sistema eólico para cubrir las demandas de energía medianas, la velocidad de 1,03 m/s es muy baja. Además, llevó

a cabo un análisis de la demanda de energía del laboratorio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, que encontró 4.505 kW, 3.919 kWh al día y 423.198 kWh al año. Además, planifiqué un sistema de aerogeneradores para satisfacer esta necesidad de energía. El sistema incluyó 100 aerogeneradores verticales Savonius con generadores PMG220-01 de 200 RPM, 50 reguladores WS-WSC30 de 30A del modelo WS-WSC30, 24 baterías Trojan T-1105, un inversor Victron Energy del modelo Phoenix 24/5000 y una variedad de tamaños de conductores eléctricos. NYY, de 2,5 mm², 4 mm², 6 mm², 10 mm² y 120 mm².

Energía Eólica. Según el Equipo INIECO (2011) es posible convertir la energía del viento en energía eléctrica, permitiendo satisfacer la demanda eléctrica, o parte de ella, en lugares específicos como hogares, edificios de oficinas, almacenes y negocios. Además, de funciones adicionales como el alumbrado público, la señalización y las telecomunicaciones; la mini eólica es una tecnología menos desarrollada que la gran eólica y tiene características propias que requieren un tratamiento regulatorio específico, tanto técnico, económico como social; esto se debe a que uno de sus mercados más interesantes se encuentra en las zonas urbanas. La característica distintiva de las mini eólicas es que utilizan instalaciones de tamaño reducido para generar energía. Se lleva a cabo a través de aerogeneradores que tienen un área de barrido de menos de 300 metros cuadrados y están conectados a redes de baja tensión; es posible ahorrar entre el treinta y el sesenta por ciento de la energía de una casa de manera descentralizada, reduciendo las pérdidas de transporte; esto depende del consumo medio de energía y la velocidad del viento. Es común que los barcos lleven pequeños generadores eólicos de diámetro inferior a un metro que se utilizan para cargar las baterías mientras el motor está detenido. Estos sistemas pueden utilizar el viento para alimentar las necesidades más pequeñas de la embarcación (frigorífico, cuadro de control, luces, etc.), adaptándose perfectamente a su entorno.

Tipos de generadores eólicos.

Villarrubia (2013) señala que la viabilidad técnica y económica de la energía eólica se ha demostrado en la actualidad, ya que es una tecnología avanzada. Pudiendo clasificarse según varios criterios:

- a) Según la disposición del eje de giro:
 - Eje horizontal: La mayoría de las turbinas eólicas pertenecen a este tipo.
 - Eje vertical: Hay muy pocas aplicaciones prácticas.
- b) Según el número de palas:
 - Monopalas y bipalas: Estos tipos son escasos.
 - Tripala: se encuentra en la mayoría de turbinas.
 - Multipala: con un número variable de 16 a 24, utilizadas para bombeo de agua.
- c) Según la velocidad del rotor de la turbina eólica:
 - Velocidad constante
 - Velocidad variable
 - Velocidad semivariable
 - Dos velocidades
- d) Según su control y regulación:
 - Control por pérdida aerodinámica (stall control) o de palas de paso fijo.
 - Control por pérdida activa aerodinámica (active stall control).
 - Control por variación del ángulo del paso de pala (pitch control).
- e) Según el generador eléctrico:
 - Generador asíncrono con rotor en jaula de ardilla.
 - Generador asíncrono con rotor bobinado doblemente alimentado.
 - Generador síncrono multipolo.
- f) Según su emplazamiento:
 - Aerogeneradores para emplazamientos terrestres (Onshore).
 - Aerogeneradores para emplazamientos marinos (Offshore)
- g) Según el tipo de viento:
 - Aerogeneradores para viento clase I, clase II o clase III.
- h) Respecto a su interconexión con la red eléctrica:

- Sistemas eólicos aislados (“en isla”), sin o con energía auxiliar (“híbridos”).
- Sistemas eólicos interconectados con la red eléctrica.
 - i) Según su potencia nominal:
 - Microturbinas eólicas (< 5 kW).
 - Miniturbinas eólicas (5 – 100 kW).
 - Turbinas de media y gran potencia (100 a 1.000 kW).
 - Turbinas multimegavat (1.000 a 5.000 kW).

La relación entre la velocidad nominal del viento y la velocidad lineal del extremo de la pala es un factor que distingue entre los diferentes tipos de turbinas eólicas. La relación conocida como velocidad específica de la turbina o relación de velocidad típica se denomina λ (lambda). La velocidad del viento para la que la turbina alcanza su potencia nominal es la velocidad del viento nominal. En general, oscila entre 11 y 15 m/s (40 a 54 km/h). La máquina tiene un par de arranque grande y muchas palas para valores de λ inferiores o del orden de la unidad. Corresponde a turbinas que se utilizan para bombear agua y que a veces se conocen como máquinas lentas. Por otro lado, en valores más altos de λ , la turbina tiene menos palas (bipala o tripala), presenta un par de arranque menor y tiene una mayor velocidad en el extremo de la pala. La velocidad de giro en grandes aerogeneradores es de 10 a 20 rpm y la velocidad lineal en el extremo de la pala es de 60 a 90 m/s.

Turbina de eje vertical tipo Savonius.

Como indica Sabry (2022) la turbina Savonius, es un tipo de turbina eólica de eje vertical (VAWT) que utiliza la fuerza del viento en un eje que gira. La turbina está compuesta por una serie de perfiles aerodinámicos, que suelen estar colocados verticalmente en un eje giratorio o marco. Esto puede ser un sistema terrestre o un sistema aéreo. Savonius es uno de los tipos más simples de turbinas, es un dispositivo de tipo arrastre con dos o tres cucharas que funcionan de la misma manera aerodinámicamente. Según la teoría de Betz, donde esté la densidad del aire, la altura, el diámetro del

rotor y la velocidad del viento, se puede extraer la máxima potencia de un rotor. Sin embargo, en realidad solo se puede extraer aproximadamente la mitad de la energía del viento (se podría argumentar que, en un momento dado, solo la mitad del rotor, la cuchara que se mueve en sincronía con el viento, está funcionando) como resultado, se obtiene:

$$P_{max} = 0.18kgm^{-3} \times h \times d \times v^3$$

Un rotor Savonius del tamaño de un barril de aceite, por ejemplo, con dimensiones de $h=1$ y $r=0.5m$, cuando es sometido a una velocidad del viento de $v=10m/s$, puede producir una potencia máxima de 180 watts y una velocidad angular máxima de 20 rad/s (190 revoluciones por minuto). Las turbinas Savonius se utilizan cuando el costo o la confiabilidad son más importantes que la eficiencia. Como resultado, la mayoría de los anemómetros son turbinas Savonius, aunque la aplicación de detección de velocidad no se preocupa por su eficiencia. En boyas de aguas profundas, que solo requieren cantidades modestas de electricidad y requieren un mínimo de mantenimiento, se han utilizado las turbinas Savonius más grandes para producir energía eléctrica. A diferencia de las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT), la turbina puede arrancar sola y no necesita un dispositivo señalador para tener en cuenta el cambio de dirección del viento, lo que simplifica el diseño. Esto hace que el diseño sea más sencillo y eficiente. Savonius y otras máquinas de eje vertical no se conectan a la red eléctrica en la mayoría de los casos porque son más adecuados para aplicaciones que requieren un par fuerte a bajas revoluciones por minuto (rpm), como el bombeo de agua.

Para emplear el lenguaje internacionalmente reconocido, se describirá la eficiencia como el coeficiente de potencia (C_p), que representa la potencia generada por el aerogenerador dividida por la potencia del viento suministrada ($1/2 \rho V^3 A$). Por otro lado, el coeficiente de velocidades o velocidad específica (λ) se define como la proporción entre la velocidad tangencial en el extremo de las palas y la velocidad del viento ($\lambda = \Omega R/V$).

MÉTODO

Es investigación de diseño experimental tecnológica.

La Población y muestra, se tomó un total de 06 muestras (valores de la relación de velocidad periférica del rotor), trabajando con un muestreo probabilístico aleatorio simple.

Figura 1.

Analizador FLUKE modelo 810



Fluke (2018), el analizador de Vibraciones FLUKE modelo 810 es un instrumento avanzado para la predicción de mantenimiento. Mide y analiza la vibración de la maquinaria industrial para encontrar problemas como fallas de rodamientos, desalineación y desequilibrio. Realiza diagnósticos

Descripción de instrumentos para recolección de datos

Se utilizó los siguientes instrumentos para mediciones de datos confiables:

precisos y produce informes detallados. Es robusto y portátil para su uso en entornos industriales, con una pantalla fácil de entender, conectividad USB y Bluetooth. Es fundamental para garantizar un funcionamiento eficiente de los equipos mecánicos y evitar costosas averías.

Figura 2.

Multímetro Digital Marca Gold Hardware modelo M890C



Digital Instrument (2010), el Multímetro Digital Gold Power M890C tiene una pantalla LCD fácil de leer y una amplia gama de mediciones para voltaje, corriente, resistencia y frecuencia; además, tiene funciones útiles como medición de continuidad y prueba de diodos, protección contra sobrecarga para mayor seguridad y una función de retención de datos que guarda las mediciones para su revisión. Su pequeño tamaño y su funda protectora lo hacen fácil de transportar y almacenar en cualquier lugar de trabajo.

El procesamiento y análisis de datos son:

Potencia disponible.

Se calculó con la expresión siguiente:

$$P_a = C_P \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3$$

Donde:

Pa: es la potencia mecánica.

ρ : es la densidad del aire.

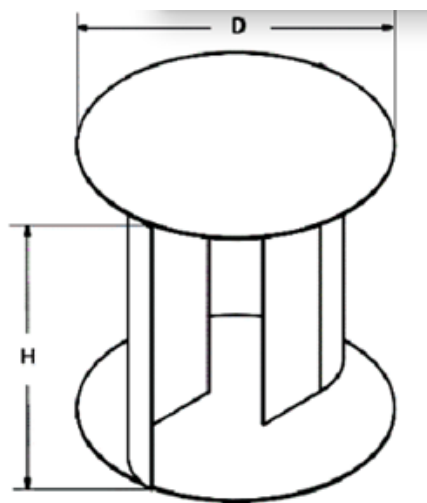
S: es el área efectiva interceptada por las palas.

V: es la velocidad del viento.

C_P : es el coeficiente de potencia, que varía según el diseño de la turbina y las condiciones de operación.

Figura 3.

Área de estructura álabes



La densidad (ρ) se calculó para las condiciones de la locación de estudio, por lo tanto:

$$\text{Densidad} = \frac{P_o}{R \times T} \times \frac{e^{-g \times z}}{R \times T}$$

Donde:

Po: Presión atmosférica $\rightarrow 1012$ hPa (hectopascal) – 101200 Pa

R: Constante específica del aire seco $\rightarrow 286.9$ J/kg.K

T: Temperatura en Kelvin (K) $\rightarrow 22$ °C – 295.15 K

g: Aceleración debida a la gravedad $\rightarrow 9.81$ m/s²

z: altura sobre el nivel del mar $\rightarrow 1410$ m.s.n.m

Reemplazando:

$$\text{Densidad} = \frac{101200 \text{ Pa}}{286.9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 295.15 \text{ K}} \times \frac{e^{-9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1410 \text{ m.s.n.m}}}{286.9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times 295.15 \text{ K}}$$

$$\text{Densidad} = 1.015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Se necesitó también el Área (A) para las siguientes operaciones.

Entonces:

$$\text{Área} = h \times D$$

$$\text{Área} = 1.40 \text{ m} \times 0.825 \text{ m}$$

(Valores escogidos por la facilidad de montaje)

$$\text{Área} = 1.155 \text{ m}^2$$

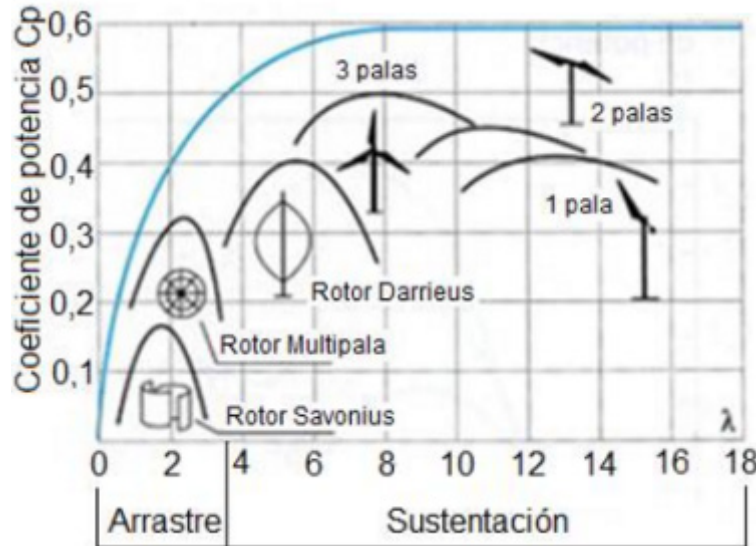
Nota: Alit et al. (2018)

Teniendo como dato la velocidad del viento de $V = 4.44 \text{ m/s}$, únicamente quedó determinar el coeficiente de potencia, sin embargo, la

gráfica siguiente muestra el comportamiento del coeficiente de potencia para distintos valores de la velocidad periférica (λ).

Figura 4.

Coefficiente de potencia en función de Lamda



Nota: Lecuona (2002)

En la gráfica se puede ver que el máximo valor de la velocidad periférica es de $C_p = 0.18$, valor que se desea alcanzar y con el cual calcularemos la potencia. Con una velocidad del viento medida en el lugar de prueba de $V = 4.44 \text{ m/s}$.

$$P_a = C_p \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3$$

$$P_a = 0.18 \times \frac{1}{2} \times 1.015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.155 \text{m}^2 \times (4.44 \text{ m/s})^3$$

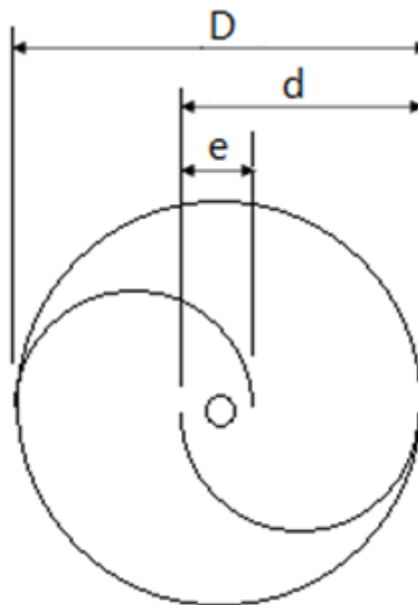
$$P = 9.23 \text{ watts}$$

La relación de superposición.

Según la figura esta se define como: d/e

Figura 5.

Diagrama de turbina Savonius



Donde se sabe que:

$$\frac{1}{6} \leq \frac{e}{d} \leq \frac{1}{3}$$

Para el presente estudio se trabajó con:

$$e/d = 1/6$$

Además, se sabe que:

$$D = 2d - e$$

Con lo cual tenemos que

$$d = 450 \text{ mm}$$

$$e = 75 \text{ mm}$$

Cálculo de la solidez del rotor.

$$\sigma = \frac{n \cdot c}{D}$$

Donde:

n = Número de alabes

c = Cuerda de los alabes

D = Diámetro del rotor

$$\sigma = \frac{2 \times 450}{825} = 1.09$$

Se considera adecuados valores que son mayores a 0.4, por lo que el diseño es adecuado.

Relación de aspecto.

$$\frac{H}{D} = \text{Debe ser mayor a } 1$$

H= Altura de álabes

D= Diámetro de álabes

$$\frac{1.40}{0.825} = 1.697$$

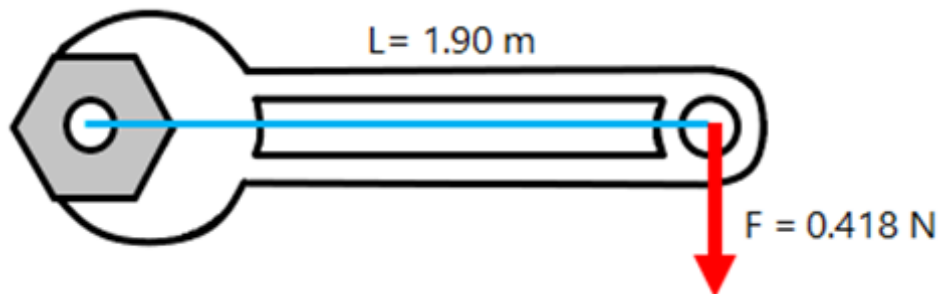
RESULTADOS

Determinación del torque.

La carga máxima de la turbina Fuerza=0.418 N, y los RPM del rodete w = 45 RPM sabiendo que L =1.90m

Figura 6.

Diagrama representativo de torque



$$T = F \times L$$

$$T = 0.418 \text{ N} \times 1.90 \text{ m}$$

$$T = 0.794 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Cálculo del Cp (Coeficiente de potencia).

$$C_p = \frac{T \times W}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3}$$

$$C_p = \frac{0.794 \text{ N} \cdot \text{m} \times 4.7124 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \times 1.015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.155 \text{ m}^2 \times (4.44 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3}$$

$$C_p = 0.073$$

Donde:

T= Torque (0.794 N·m)

W= RPM del rodete (45 RPM o 4.7124 rad/s)

ρ = Densidad del aire en Moquegua (1.015 kg/m³)

A = Área del rodete (1.155 m²)

V= Velocidad del viento (4.44 m/s)

Determinación de la velocidad periférica (TSR).

$$\lambda = \frac{W \times \pi \times D}{V \times 60}$$

$$\lambda = \frac{45 \text{ RPM} \times \pi \times 0.825 \text{ m}}{4.44 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 60}$$

$$\lambda = 0.43$$

Potencia mecánica o potencia aprovechada

$$P_a = C_p \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3$$

Donde:

Pa: es la potencia mecánica.

ρ: es la densidad del aire.

S: es el área efectiva interceptada por las palas.

V: es la velocidad del viento.

Cp: es el coeficiente de potencia, que varía según el diseño de la turbina y las condiciones de operación.

$$S = D \times H$$

$$C_p = 0.073$$

$$\rho = 1.015 \frac{kg}{m^3}$$

$$V = 4.44 \text{ m/s}$$

Esta fórmula nos dio la potencia mecánica generada por la turbina Savonius en función de la velocidad del viento y otros parámetros específicos de la turbina.

Reemplazando:

$$S = D \times H$$

$$S = 0.825 \text{ m} \times 1.40 \text{ m}$$

$$S = 1.155 \text{ m}^2$$

Entonces:

$$P_a = C_p \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3$$

$$P_a = 0.073 \times \frac{1}{2} \times 1.015 \frac{kg}{m^3} \times 1.155 \text{ m}^2 \times \left(4.44 \frac{m}{s}\right)^3$$

Resultado:

$$P_a = 3.74 \text{ Watts}$$

Contrastación de hipótesis

Los resultados del muestreo se plasman en la tabla siguiente, así mismo el gráfico correspondiente que muestra la relación entre el coeficiente de potencia (Cp) y la velocidad periférica se muestra a continuación.

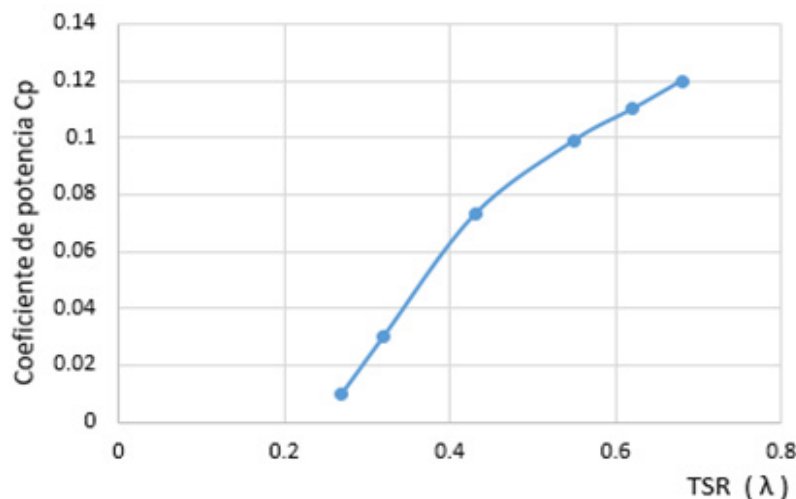
Tabla 1.

Relación entre coeficiente de potencia y velocidad periférica

Velocidad periférica (λ)	Coficiente potencia Cp
0.68	0.12
0.62	0.11
0.55	0.099
0.43	0.073
0.32	0.03
0.27	0.01

Figura 7.

Relación entre coeficiente de potencia y velocidad periférica



Para la contratación de Hipótesis se utilizó la prueba de R de Pearson, para lo que se planteó la hipótesis nula y alternativa.

Ho: La velocidad periférica en turbinas de eje vertical tipo Savonius no tiene ningún tipo de correlación con el coeficiente de potencia.

H1: La velocidad periférica en turbinas de eje vertical tipo Savonius tiene una correlación positiva con el coeficiente de potencia.

Los resultados de la prueba de Pearson en el Software SPSS nos muestran lo siguiente:

Tabla 2.
Correlaciones

	VARIABLES DE CONTROL	tsr	cp
tsr	Sig (bilateral)	1	0,984**
	Sig (bilateral)		0,000
	N	6	6
cp	Sig (bilateral)	984**	1
	Sig (bilateral)	0,000	
	N	6	6

Nota: **La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Por lo que se concluye que debido a que el nivel de significancia (sig.) es menor a 0,01 significa que existe relación muy significativa entre las dos variables y que debido a que el valor de R de Pearson es mayor a 0,90 y muy cercano a uno se puede afirmar que existe una correlación positiva muy fuerte.

señala (Bacilio & Inuma, 2020) que se obtuvo un mejor resultado en la modificación 1 con 1.7193 kWh/año en comparación con los 32.4216 kWh/año que se tendría en el prototipo en estudio. (López, 2021) durante la evaluación determinó que el rango de velocidad de viento en el que opera el prototipo es de 2.5 m/s a más, dando una proyección de generación de energía eléctrica proyectada de 62.71 kW/hora equivalente a 3.7626 watts/min.

DISCUSIÓN

La potencia eléctrica de 3.74 Watts que alcanza el generador de la turbina tipo Savonius, permite comprobar que no es factible el aprovechamiento del recurso eólico disponible en la ciudad de Moquegua. Pese a que la potencia a generar no es elevada, el estudio permite contemplar diversas posibilidades de modificación en el diseño con el fin de optimizar desempeño aerodinámico. Por otro lado, los estudios similares realizados anteriormente, como es el caso de la optimización del diseño de la turbina eólica Savonius en el que se alcanzó un coeficiente de potencia de 0.21 para una velocidad de 12 m/s y dando como resultado 3.64 watts (Torres, 2021) permiten corroborar que las potencias que se pueden alcanzar en este contexto no son elevadas. De la misma manera

CONCLUSIONES

Se concluye que el incremento de la relación de velocidad periférica en turbinas de eje vertical tipo Savonius provoca elevados valores en el coeficiente de potencia, respaldado por una correlación positiva muy alta entre ambas variables según la prueba r de Pearson. Sin embargo, se observa una baja eficiencia en el aprovechamiento de la potencia disponible y limitaciones en la capacidad de alcanzar altas velocidades de rotación, como se evidencia en los resultados obtenidos en la investigación, donde el coeficiente de potencia alcanzado fue Cp=0.073 y el valor del coeficiente de velocidad periférica (TSR) para una velocidad de 4.44 m/s fue de λ=0.43.

REFERENCIAS

- Alave-Vargas, E., Orellana, R., & Sempértugi-Tapia, D. (2022). Estado del arte sobre aerogeneradores de eje vertical. *Investigación & Desarrollo*, 22(1), 161-172.
- Asociación danesa de la industria eólica. (2003). Danish wind industry association. Recuperado de <http://www.windpower.org/es/tour/wres/cp.htm>
- Bacilio, V., & Inuma, D. (2020). Diseño y simulación de un prototipo de generador eólico múltiple de eje vertical mediante el software SolidWorks para la generación de energía eléctrica en el distrito de Usquil - Otuzo - 2020 (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú.
- Barrero, F. (2004). *Sistemas de energía eléctrica*. Madrid: Thomson Editores Spain.
- Berna, J. (2020). Diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo Savonius para la localidad de Tanaka (Tesis de pregrado). Universidad Continental, Arequipa, Perú.
- Cifuentes, J., Aguirre, L., Chuquiej, B., & Granados, W. (2016). *Instrumentación industrial - Anemometro*. Universidad de San Carlos de Guatemala, 1-20.
- Da Riva de la Cavada, I. (1992). *Aerodinámica*. Madrid.
- Digital Instrument. (2010). *Manual de usuario*. Digital Instrument.
- Equipo INIECO. (2011). *Desarrollo de proyectos de instalaciones de energía mini-eólica aislada*. España: Publicaciones vértice SL.
- Fluke. (2018). *Manual de Fluke 810 vibration tester*. Países Bajos: Fluker Corporation. Recuperado de <https://www.fluke.com/es-pe/producto/mantenimiento-mecanico/analisis-de-vibraciones/fluke-810>
- López, E. (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, Huacho, Perú.
- Osinergmin. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú. 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Lima: Gráficos Biblios SA.
- Patricio, Y. (2021). Análisis de una turbina eólica tipo Savonius por medio de dinámica de fluidos computacional (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal de México, México.
- Ramírez-Gómez, C., Saavedra-Montes, A., & Ramos-Paja, C. (2013). Modelado y estimación de parámetros de un sistema de generación eólico de baja potencia. *Tecno Lógicas*, 209-221.
- Rivas, J., Velázquez, M., & Castillo, M. (2023). Factibilidad de implementación de un sistema aerogenerador en la Huasteca Hidalguense. *Memorias del Congreso científico tecnológico de las carreras de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Industrial y Telecomunicaciones, Sistemas y electrónica*, 1-5.
- Sabry, F. (2022). *Turbina de viento aerotransportada: una turbina en el aire sin torre*. One.
- Suárez, N. (2021). Diseño de un aerogenerador eólico para cubrir la demanda eléctrica al laboratorio de ingeniería eléctrica al laboratorio de ingeniería mecánica y eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú.
- Torres, S. (2021). Optimización del diseño de la turbina eólica Savonius (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
- Villarubia, M. (2013). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Distrito Federal de México: Alfaomega Grupo Editor.