

ARTÍCULO ORIGINAL**Determinación de la densidad de potencial eólico en la provincia de Jaén, Perú, utilizando el Método Weibull****Determination of the wind potential density in the province of Jaén, Peru, using the Weibull Method**Béker Pariacuri¹ **RESUMEN**

El potencial eólico representa una fuente de energía alternativa necesaria para una sociedad eco-amigable, dado que las energías convencionales generan residuos peligrosos y mortales. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo determinar la densidad de potencial eólico en la ciudad de Jaén. La metodología empleada es cuantitativa con una orientación mixta, combinando el análisis de datos numéricos obtenidos de fuentes meteorológicas, con una evaluación cualitativa para calificar la densidad de potencial eólico. Los datos analizados corresponden al periodo 2015-2023. Los resultados indican una probabilidad mayor al 45% de que la velocidad del viento se encuentra de 2.832 a 3.540 m/s, mientras que existe una probabilidad de 3% de registrar velocidades de 4.956 m/s. En ambos casos, se aplicó de manera efectiva la Función Densidad “f(v)”. Asimismo, el análisis de la Función Probabilidad “F(v)” reveló que a una velocidad de 2.832 m/s, existe una probabilidad de 40% de que el viento sea menor, mientras que a una velocidad de 3.540 m/s, esta probabilidad asciende al 70%. Finalmente, se obtuvo una Densidad de Potencia “P_w/A” de 22.8680 W/m², demostrando que los vientos de la ciudad son aptos para turbinas de baja potencia y verticales.

Palabras clave: Energías renovables; Energía eólica; Weibull; Jaén - Perú.

ABSTRACT

Wind energy potential represents an alternative energy source necessary for an eco-friendly society, given that conventional energies generate hazardous and lethal waste. In this context, the present study aims to determine the density of wind potential in the city of Jaén. The methodology employed is quantitative with a mixed orientation, combining the analysis of numerical data obtained from meteorological sources, with a qualitative assessment to qualify the wind potential density. The data analyzed corresponds to the period 2015-2023. The results indicate a greater than 45% probability that the wind speed will be from 2,832 to 3,540 m/s, while there is a 3% probability of registering speeds of 4,956 m/s. In both cases, the Density Function “f(v)” was effectively applied. Likewise, the analysis of the Probability Function “F(v)” revealed that at a speed of 2.832 m/s, there is a 40% probability that the wind is lower, while at a speed of 3.540 m/s, this probability rises to 70%. Finally, a Power Density “P_w/A” of 22.8680 W/m² was obtained, demonstrating that the city's winds are suitable for low power and vertical turbines.

Keywords: Renewable energies; wind energy; Weibull; Jaén - Peru.

* Autor para correspondencia

1 Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: bekerpariacuri@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El análisis de la densidad de potencial eólico es fundamental para evaluar la viabilidad de proyectos de energía renovable, y numerosos estudios en diferentes partes del mundo han abordado este tema. Estas investigaciones suelen combinar el análisis de datos meteorológicos con métodos como el de Weibull para evaluar la densidad de potencial eólico y determinar si es viable implementar proyectos eólicos en una región. En la provincia de Jaén, el principal problema es la falta de información precisa y actualizada sobre la distribución y densidad del potencial eólico, lo que ha impedido el avance de proyectos de este tipo. Además, se cuenta con un número limitado de estaciones meteorológicas que registran de manera continua la velocidad del viento.

El estudio de Cervantes et al. (2015) estima el potencial eólico para alturas superiores a 30 m mediante mediciones experimentales de la velocidad del viento, extrapola los datos a una altura de 80.1 m utilizando la distribución de Weibull y concluye que, para aumentar el potencial eólico en un 50%, es necesario incrementar la altura en un 200%. Como es evidente, la distribución de Weibull es fundamental para evaluar la viabilidad de proyectos eólicos.

Otro estudio hecho por De Ávila et al. (2021) analizó los datos de velocidad del viento de una estación meteorológica durante 24 horas por un mes. Los resultados muestran que el método de Weibull es confiable para evaluar el potencial de energía eólica y obtener información clave sobre la variación de la velocidad del viento y la densidad de potencia media en la zona. El estudio subraya la importancia de recopilar datos meteorológicos, especialmente de velocidad del viento, para determinar la densidad de potencia y evaluar la viabilidad de proyectos eólicos.

De igual forma, Eraso-Checa et al. (2017) destacaron la importancia de usar datos auténticos para futuras implementaciones de generadores eólicos. Realizaron un análisis estadístico utilizando medidas de tendencia central y la distribución de Weibull para organizar los datos. El estudio encontró una velocidad de viento promedio de 4.4 m/s y una densidad de potencia de 3.47 W/m². En este caso, la distribución de Weibull fue clave para obtener una respuesta cualitativa relevante sobre la densidad de potencia.

En Perú, se enfatiza la necesidad de estudios sobre la disponibilidad de energía eólica para su valorización. Un estudio en Laraqueri, basado en datos de 2020 a 10 m de altura, usó la función de Weibull para concluir que la zona es ideal para generación de baja potencia (Yancachajlla y Vilca, 2022). Otro en Juliaca, comparando datos de la NASA y SENAMHI a 25 m, encontró una densidad de potencia media anual de 15.91 W/m², confirmando el potencial para proyectos de baja potencia (Quiñonez et al., 2019). En Pimentel, un análisis de la ley de Betz y Weibull concluyó que el 59% de la energía del viento

es aprovechable y resaltó la importancia de datos meteorológicos de al menos 5 años para estudios de factibilidad (Pérez et al., 2017).

En una investigación realizada en la provincia de Santa Cruz, Cajamarca, se evaluó el potencial eólico en el cerro Cotorumi, motivado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Utilizando la distribución de Weibull y datos satelitales a 50 metros de altura, se determinó un potencial eólico de 94.48 W/m^2 y una potencia máxima extraíble de 37.8 W/m^2 (Carrasco, 2023).

De manera similar, en el caserío Llushcapampa, provincia de Chota, se abordó la falta de energía eléctrica, un problema común en zonas rurales de Cajamarca. A través de mediciones tomadas en la estación meteorológica de Huambos, se proyectó que la energía promedio necesaria para la zona es de $49,432 \text{ kWh/día}$, con una demanda máxima de $16,844 \text{ kW}$. El estudio concluyó que un aerogenerador ENAIR 30 PRO de 3 kW , en un sistema híbrido eólico-solar, sería suficiente para cubrir las necesidades energéticas de la comunidad (Santos, 2019).

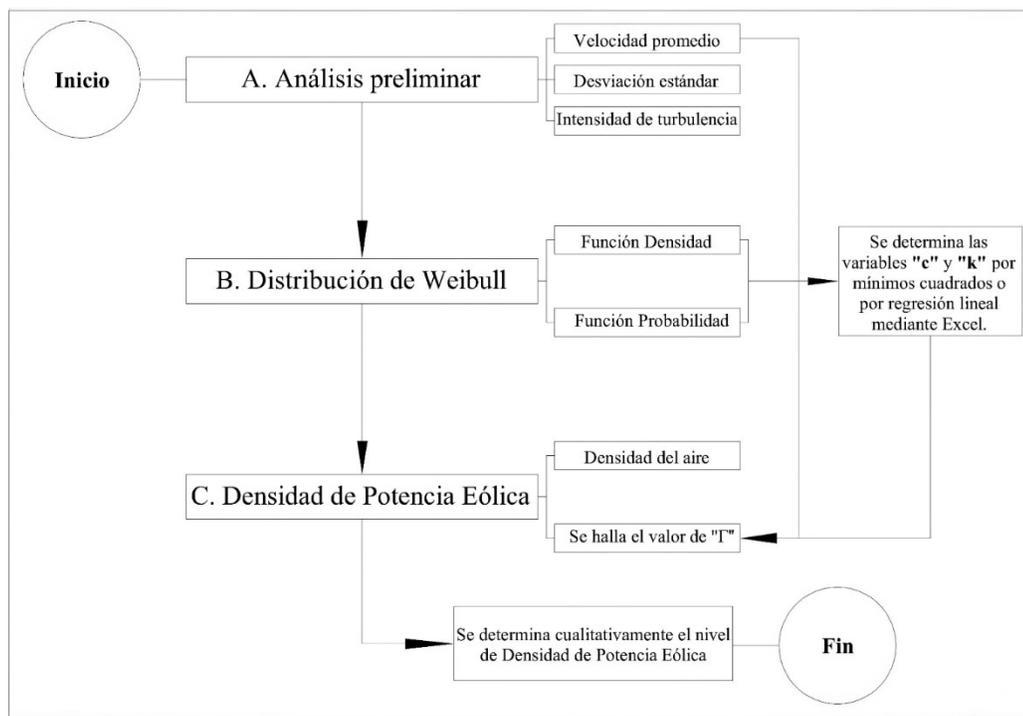
Finalmente, en el Sector El Pongo, Jaén, se destacó la importancia de las energías alternativas en áreas sin acceso a electricidad. El estudio registró una velocidad de viento de 3.69 m/s a 10 metros de altura y estimó que se necesitarían tres aerogeneradores para producir un promedio de 27.0 kWh/día . Los autores subrayaron la necesidad de continuar investigando el potencial eólico de la región para obtener datos más precisos y evitar conclusiones basadas en supuestos empíricos (Vera y Lizana, 2022).

Los estudios analizados destacan la necesidad de incorporar energías alternativas con especial énfasis en el aprovechamiento del viento como fuente energética. De esta forma se busca diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de fuentes convencionales. Frente a esta situación, se propone el método Weibull para evaluar la densidad de potencial eólico y determinar la viabilidad de proyectos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr determinar la densidad de potencial eólico, es necesario realizar un análisis con la función probabilidad y densidad de Weibull, encontrando estos parámetros necesarios que ayudarán a obtenerlo. Además, Weibull, ayudó a conocer la frecuencia y duración de velocidades del viento de manera precisa, otro punto importante es que se puede percibir de manera gráfica cómo se comporta esta distribución, ayudando, a poder determinar si existe la viabilidad de un proyecto eólico en el lugar de estudio. A continuación, se presenta el diagrama de flujo respectivo para llevar a cabo el estudio.

Figura 1
Diagrama de flujo



La investigación se llevó a cabo en la provincia de Jaén, ubicada al noreste del departamento de Cajamarca. Esta zona se caracteriza por su posición geográfica, con coordenadas de -5.69918 latitud sur y -78.8009 longitud oeste. La provincia abarca una superficie total de 537.25 km², presentando una topografía variada que se refleja en su altitud media de 729 m.s.n.m. Estas características geográficas son fundamentales para entender el contexto en el que se desarrolló el estudio y sus posibles implicaciones.

A) Análisis preliminar

Para analizar los sitios de viento, se requiere información sobre su comportamiento, pero no se pueden predecir con precisión variables caóticas como la dirección y la velocidad del viento, sin embargo, la velocidad promedio, la desviación estándar y la intensidad de turbulencia, son variables necesarias para tener un panorama a grandes rasgos de la zona de estudio (Yancachajlla y Vilca, 2022).

Antes de aplicar el método de Weibull, se determina estos datos necesarios para entender las características de nuestra zona de estudio, en este caso Jaén.

Latitud y Longitud: sirve para identificar la zona de estudio, en este caso la parte Nororiental del Perú, para latitudes cercanas a la línea ecuatorial existe un clima por lo general cálido y las temperaturas tienden a ser altas a lo largo del año, con casi pocas diferencias entre estaciones.

Altitud: Aunque la provincia de Jaén se encuentra a unos 729.0 m.s.n.m, los datos conseguidos del portal web Nasa Power nos da una altitud de 1312.1700 m.s.n.m.

La $V_{promedio}$ y la Desviación Estándar: son necesarios para poder calcular el valor de gamma “ Γ ”, posteriormente.

Intensidad de turbulencia: frecuentemente la **It** se encuentra entre 0.1 – 0.4, resaltando que las **It** más altas se producen a baja velocidad de viento (Manwell et al., 2009, p. 40).

A.1. Velocidad promedio

También, conocido media de la velocidad del viento

$$v_{promedio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (1)$$

A.2. Desviación Estándar

Calcula la variación o dispersión en la que los puntos de datos individuales difieren de la media (Jamil et al., 1995; Keyhani et al., 2010).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{promedio})^2} \quad (2)$$

A.3. Intensidad de turbulencia

Desviación típica de la velocidad horizontal dividida entre la velocidad media del viento en un período de tiempo típicamente de 10 minutos (Célestin et al., 2019).

$$I_t = \frac{\sigma}{v_{promedio}} \quad (3)$$

Donde:

- $v_{promedio}$: Velocidad promedio (m/s).
- N : Número de datos evaluados.
- v_i : Velocidad del aire para un periodo específico (m/s).
- σ : Desviación estándar para una muestra
- I_t : Intensidad de turbulencia (%)

B. Distribución de Weibull

Sí existen datos de velocidad de vientos por lo menos para el intervalo de un año, la función de distribución de probabilidad de Weibull, describe de manera concisa las curvas de frecuencia. Cabe acortar que, la función de Weibull consta de dos parámetros. Además; si las velocidades del viento $v > 0$ están distribuidas de acuerdo a la distribución de Weibull o **Función de Densidad (distribución de la densidad del viento de Weibull)** es la siguiente (Justus et al., 1978; Keyhani et al., 2010):

$$f_{(v)} = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Se define que “ “**c**”, indica qué tan "ventoso" es un lugar de viento bajo consideración, mientras que el parámetro de forma, **k**, indica qué tan pico es la distribución del viento, es decir, si las velocidades del viento tienden a estar muy cerca de un cierto valor” (Keyhani et al., 2010).

Donde:

- c** : Parámetro de la escala de Weibull.
- k** : Parámetro de la forma de Weibull adimensional.
- $f_{(v)}$: Función densidad (representa una cantidad %)
- v_i : Velocidad del viento (m/s).

Entonces para determinar estos parámetros, se recurre al ajuste por mínimos cuadrados, que corresponde a la ecuación de **Probabilidad de Weibull**:

$$Fi_{(v < v_i)} = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \tag{5}$$

Donde:

- $Fi_{(v < v_i)}$: Función Probabilidad de Weibull (representa una cantidad %)
- v_i : Velocidad del viento (m/s).

Además, se utiliza el método de regresión lineal, para relacionar las variables implicadas, y nos da como resultado las siguientes ecuaciones (Justus et al., 1978):

$$y_i = \ln(-\ln(1 - Fi)) \tag{6}$$

$$x_i = \ln(v_i) \tag{7}$$

$$a = -k \ln(c) \tag{8}$$

$$b = k \tag{9}$$

Estos datos se pueden obtener a partir de los datos recopilados y procesados de manera sistemática con la siguiente tabla:

Figura 2

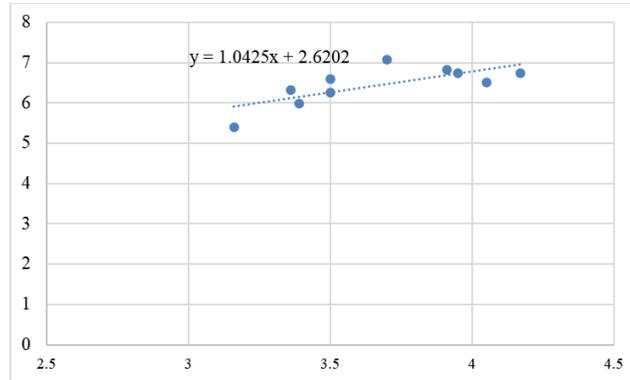
Tabla de distribución de Weibull.

Días	Velocidad	Frec. Acumulada (dentro de cada intervalo)	$x_i = \ln(v_i)$	$y_i = \ln(-\ln(1 - Fr. Ac))$	Vprom	Rango Max	Rang Min	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Nota: La figura mostrada es referencial, ya que es necesario realizar un análisis estadístico descriptivo.

Luego, se realiza la gráfica de “ $x_i - y_i$ ”.

Figura 3
Gráfico de Dispersión “ $x_i - y_i$ ”.



También, utilizando las ecuaciones de mínimos cuadrados se puede conseguir, su dispersión y sus parámetros de la Ecuación de Weibull. Teniendo, en cuenta la siguiente forma de la Ecuación:

$$y_i = kx_i + a \quad (10)$$

Ecuaciones de mínimos cuadrados:

$$b = k = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i} \quad (11)$$

$$a = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i} \quad (12)$$

Se despeja, de la siguiente forma el valor de “ c ” (Ec. 8) se obtiene:

$$c = e^{\left(\frac{-a}{k}\right)} \quad (13)$$

C. Densidad de Potencia Eólica (P_w/A)

Define de manera puntual la cantidad de energía producida por diferentes velocidades del viento en un sitio seleccionado (Jamil et al., 1995; Parajuli, 2016; Yancachajlla y Vilca, 2022).

$$\frac{P_w}{A} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v_i f_{(v)} dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (14)$$

Donde:

- ρ : Densidad de aire estándar, considerada principalmente como constante de 1.225 kg/m³ a nivel del mar (1 atm) y 15° C.
- A : Área barrida de la turbina (m²).
- k : Parámetro de la forma de Weibull adimensional.
- Γ : Valor Gamma.
- $\frac{P_w}{A}$: Densidad de Potencia Eólico (W/m²).
- c : Parámetro de la escala de Weibull.

Si se desea conocer de manera más específica la densidad del aire (ρ) puede determinar de forma indirecta conociendo la temperatura y altura sobre el nivel del mar (Yancachajlla y Vilca, 2022).

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (15)$$

Donde:

T : Temperatura del lugar ($^{\circ}\text{C}$)

h : Altura del lugar m.s.n.m. (m).

ρ : Densidad de aire (kg/m^3).

Sí no se conoce el valor de, Gamma, se puede encontrar relacionando las Ec. 1, Ec. 11 y Ec. 13; y se despeja Γ (Khahro et al., 2014)

$$c = \frac{v_{\text{promedio}}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (16)$$

$$\Gamma = \frac{v_{\text{promedio}}}{c \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (17)$$

Para evaluar la magnitud cualitativa del recurso eólico y se considera la siguiente tabla:

Tabla 1

Densidad de Potencia.

<i>Densidad de potencia</i>	Cualidad
$\frac{P_w}{A} < 100 \text{ W}/\text{m}^2$	Bajo
$\frac{P_w}{A} \approx 400 \text{ W}/\text{m}^2$	Bien
$\frac{P_w}{A} > 100 \text{ W}/\text{m}^2$	Excelente

Nota: Adaptado de “Wind Energy Explained”, por Manwell et al. (2009).

D. Velocidades de viento típicos

✓ Velocidad de viento que porta energía máxima

Esta velocidad es responsable de maximizar el recurso eólico de la ubicación geográfica estudiada. Se puede cuantificar teniendo los parámetros de forma y de escala con la siguiente formula (Jamil et al., 1995; Soulouknga et al., 2017).

$$v_{\text{mec}} = c \left(1 + \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (18)$$

✓ **Velocidad de viento más probable**

Esta velocidad de viento es la más probable ocurra, dependiendo a los datos evaluados a lo largo de un periodo de tiempo. Se puede determinar a partir de los parámetros de forma y escala de manera rápida y eficiente, con la siguiente fórmula (Jamil et al., 1995; Soulouknga et al., 2017).

$$v_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \tag{19}$$

RESULTADOS

Análisis preliminar

La intensidad de turbulencia (It) en esta ubicación geográfica es aceptable, ya que se encuentra dentro del rango de 0.1 a 0.4. Asimismo, se puede inferir que el viento es estable y no presenta movimientos erráticos (Manwell et al., 2009, p. 40).

Tabla 2

Datos preliminares.

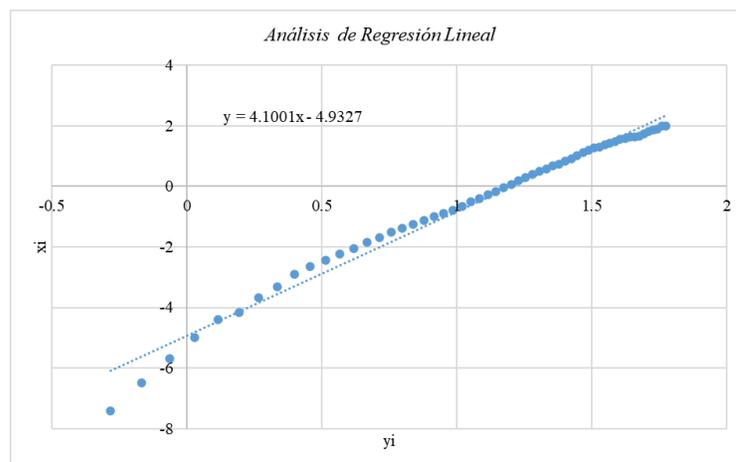
Análisis preliminar		
Detalle	Símbolo	Valor
Latitud	φ	-5.7073
Longitud	λ	-78.8079
Altitud	h	1312.1700
Vpromedio	vprom	2.9918
Desviación Estándar	σ	0.8705
Intensidad de Turbulencia	It	0.2910

Nota: La siguiente tabla muestra los valores necesarios para realizar cálculos.

Distribución de Weibull

Para realizar el ordenamiento de datos se tomó en cuentas lo proporcionado por la NASA POWER (2024) entre los años 2015-2023, para una altura de 10m, se trabajó por intervalos y se aplicó tanto la formula Excel automática y manual. Para determinar el parámetro de escala y de forma se emplearon las Ec. 11, 12 y 13; y se corroboró con el análisis de regresión lineal del programa Excel, como se muestra a continuación.

Figura 4
Análisis de regresión lineal



Nota. Los valores “ x_i ” e “ y_i ” son determinados con las Ec. 6 y 7 de acuerdo a datos evaluados.

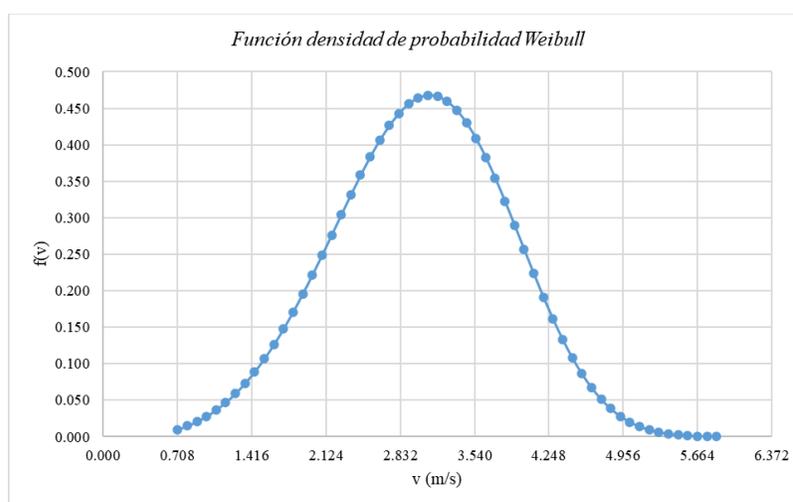
Donde, los valores son:

$$a = -4.9327 \quad || \quad k = 4.1001 \quad || \quad c = 3.3303$$

Función de Densidad

Esta función muestra la probabilidad de ocurrencia de una velocidad específica, en el gráfico se puede observar que existe una probabilidad mayor a 45% (0.450) de que la velocidad del viento este entre [2.832-3.540] m/s.

Figura 5
Función Densidad

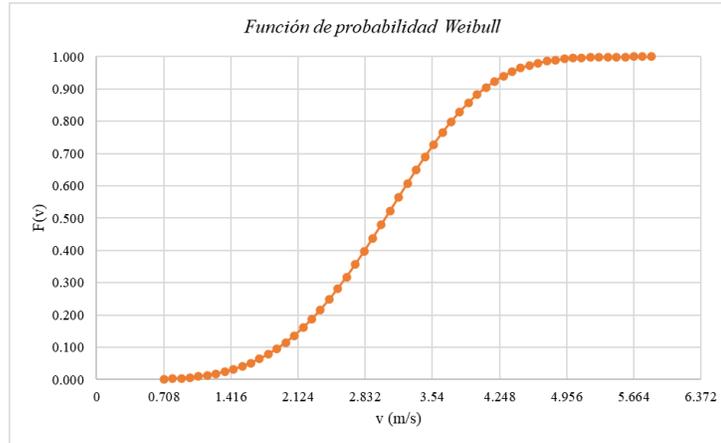


Nota. Esta gráfica utiliza la función densidad “ $F(v)$ ” (Ec. 4).

Probabilidad de Weibull

Esta función muestra la probabilidad de que la velocidad del viento sea menor o igual a una velocidad determinada, por ejemplo, a una velocidad de 2.832 m/s existe una probabilidad de 40% (0.400) de que el viento sea menor a este.

Figura 6
Función Probabilidad



Nota. Esta gráfica utiliza la función de probabilidad “ $F_{i(v < v_i)}$ ” (Ec. 5).

✓ Densidad de Potencia Eólica (P_w/A)

Teniendo en cuenta los siguientes datos claros para su cálculo, sin ningún sesgo y falta de confianza, cabe resaltar que “h” se obtuvo de los datos de la Nasa Power (2024).

c:	3.3303	h:	1312.1700 m.s.n.m
k:	4.1001	Tprom:	32 °C
vprom:	2.9918		

Remplazamos en la Ec. 17:

$$\Gamma = \frac{v_{promedio}}{c \left(1 + \frac{1}{k}\right)} = \frac{2.9918}{3.3303 \left(1 + \frac{1}{4.1001}\right)} = 0.7222$$

Seguidamente, desarrollamos la Ec. 15:

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T+273}\right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} = 1.225 \left(\frac{288}{32+273}\right) e^{-\left(\frac{1312.1700}{8435}\right)} = 0.9901 \text{ kg/m}^3$$

Finalmente, procedemos a determinar la densidad potencial eólico, según la Ec. 14.

$$\frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k}\right) = \frac{1}{2} * 0.9901 * 3.3303^3 * 0.7222 * \left(1 + \frac{3}{4.1001}\right) = 22.8680 \text{ W/m}^2$$

Este resultado $\frac{P_w}{A} = 22.8680 \text{ W/m}^2$ demuestra que los vientos en la ciudad de Jaén son aptos para turbinas de baja potencia y preferiblemente verticales. Además, la Tabla 2 enfatiza que nuestro resultado se encuentra dentro del intervalo “Bajo”; sin embargo, eso no descarta su aplicación de este tipo de energía alternativa en la ubicación geográfica estudiada.

✓ **Velocidades de viento típicos**

Conocer estas velocidades, es crucial para el diseño, selección e implementación de proyectos que involucren este tipo de energía renovable, porque permitirá que no exista sobredimensionamientos de los equipos que se seleccionen, de esta forma se optimiza recursos.

Como se mostró anteriormente, ya se han logrado determinar los valores de forma y de escala y son los siguientes:

$$k = 4.1001 \quad || \quad c = 3.3303$$

Remplazando:

Velocidad de viento que porta energía máxima

$$v_{mec} = c \left(1 + \frac{2}{k} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$v_{mec} = 3.3303 \left(1 + \frac{2}{4.1001} \right)^{\frac{1}{4.1001}}$$

$$v_{mec} = 3.6692 \text{ m/s}$$

Velocidad de viento más probable

$$v_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$v_{mp} = 3.3303 \left(1 - \frac{1}{4.1001} \right)^{\frac{1}{4.1001}}$$

$$v_{mp} = 3.1108 \text{ m/s}$$

Estas velocidades corroboran cuantitativamente una baja velocidad viento y que es posible la implementación de pequeñas turbinas eólicas de eje horizontal en nuestra ubicación geográfica estudiada.

✓ **Impacto ambiental**

Anteriormente, se resaltó que para esa cantidad de densidad de potencia eólica se necesitan turbinas de baja potencia y verticales. Este tipo de turbinas genera un mínimo de impacto ambiental, como se enumera a continuación.

1. Bajo impacto visual: este tipo de turbinas llegan a ser más pequeñas y compactas, es decir son menos visibles, a las tradicionales de eje horizontal.
2. Genera menos ruido: esto se debe a que su diseño es más aerodinámico y compacto, además, las velocidades de viento permitida para este tipo de turbinas son bajas y el flujo de aire necesario es más suave y laminar. Otro punto adicional, es que el rotor es más pequeño, comparado con los generadores de eje horizontal. Estas características en conjunto generan menos ruido al momento de su implementación.
3. Versatilidad: su instalación es más flexible, porque se puede implementar tanto en zonas urbanas o rurales, con pequeña demanda eléctrica, garantizando la no alteración de los espacios naturales.

Estos puntos, demuestran que las turbinas eólicas de baja potencia y verticales que se proponen, son ideales para generar energía eléctrica limpia, sin grandes alteraciones del medio ambiente, salvaguardando la flora y fauna de las zonas dónde se implementen este tipo de proyectos.

DISCUSIÓN

La función de probabilidad Weibull o de distribución, muestra la probabilidad de que la velocidad del viento sea menor o igual a una velocidad determinada, en tal caso nos ayuda a conocer con cierta certeza el comportamiento de la velocidad del viento para la zona geográfica estudiada. Ahora, la función densidad de Weibull muestra la probabilidad de ocurrencia de una velocidad específica. Sin embargo, según Justus (1978), en ambos casos es necesario conocer el parámetro de forma y el parámetro de escala, en este estudio se optó por el primer método que propone el *ajuste por mínimos cuadrados de la distribución*, siendo una herramienta versátil. Además; es importante recalcar que como evidencia se cita a los siguientes autores que emplean la misma técnica en sus investigaciones respectivas (Constante et al., 2021; Eraso-Checa et al., 2017; Khahro et al., 2014).

El análisis de los datos meteorológicos relacionados con la velocidad del aire permite determinar la densidad de potencia eólica disponible en nuestra provincia. Es importante destacar que un valor de 22.8680 W/m² resulta suficiente para aplicaciones a pequeña escala. Esto es particularmente relevante en el contexto de nuestra provincia, donde aún existen comunidades rurales que no cuentan con acceso a energía eléctrica, lo que convierte al recurso eólico en una posible solución a esta problemática. En esta línea, un estudio indica: “La densidad de potencia eólica calculada en Laraqueri tiene un valor promedio de 61.89 W/m², lo que representa un valor bajo” (Yancachajlla y Vilca, 2022, p. 196), y propone el uso de generadores de pequeña potencia como una opción viable para solucionar este problema.

En el siguiente estudio que se realizó Tehran, se logró determinar la densidad de potencia promedio anual de 74.00 y 122.48 W/m² siendo un resultado bajo, resaltando que, aunque se ha obtenido una probabilidad de mínima de tener velocidades inferiores a 3%, las velocidades encontradas no se

encuentran el rango 5-6 m/s, que son ideales para la generación de energía eólica, por tanto, descarta su implementación a gran escala y sugiere su aplicación en ámbitos agrícolas o rurales (Keyhani et al., 2010). En ese mismo sentido el estudio arrojó resultados similares, teniendo una densidad de potencia de 22.8680 W/m² y una velocidad de viento probable de 3.1108 m/s, no alcanzando los límites necesarios para implementación de megaproyectos eólicos, sin embargo, es una alternativa para zonas rurales y alejadas de nuestra provincia que requieran recursos energéticos eco-amigables.

Otra investigación en la Zona Sudanesa de Chad, resalta que la velocidad mínima y máxima promedio es de 1.4 y 3.3 m/s, además resalta los valores de densidades de potencia típica para tres ubicaciones que han involucrado en su estudio, Moundou, Pala y Sarh, los cuales son 17.071, 11.212 y 12.762 W/m² y comenta que esos valores son ideales para garantizar el desarrollo sostenible en zonas rurales, aprovechando el bombeo de agua, calentamiento de agua y generación de electricidad (Soulouknga et al., 2017). Como se analizó anteriormente, los resultados obtenidos reflejan que nuestra geografía se adapta a generadores eólicos de pequeña escala con un enfoque rural y amigable al ambiente.

Otro punto importante es la función de densidad, que muestra la probabilidad de que ocurra una velocidad específica del viento. En la figura 8, se observa que existe más de un 45% de probabilidad de que la velocidad del viento se sitúe entre 2.832 y 3.540 m/s. Estos valores indican que no se ha registrado una cantidad significativa de vientos dentro del rango de 5 a 6 m/s, los cuales son ideales para aplicaciones a gran escala (Keyhani et al., 2010). Sin embargo, esto no descarta su utilidad, ya que es posible aprovechar estas condiciones mediante el uso de generadores de baja potencia y de eje vertical en zonas estratégicas de nuestra provincia.

Entonces, es evidente que nuestra provincia no posee las condiciones óptimas para la implementación de megaproyectos eólicos. No obstante, es factible desarrollar proyectos eólicos a menor escala, orientados hacia el ámbito rural, agrícola, o incluso urbano en ciertos casos. Los resultados del estudio indican que la zona evaluada presenta bajas velocidades de viento y una densidad de potencia mínima. Estas características limitan las opciones tecnológicas, pero hacen viable el uso de generadores eólicos de eje vertical y de baja potencia, constituyendo una alternativa adecuada para las áreas remotas de nuestra provincia.

CONCLUSIONES

Se concluye que según la Función Densidad existe una probabilidad mayor a 45% de que la velocidad del viento esté entre 2.832-3.540 m/s y a una velocidad de viento de 4.956 m/s tiene una probabilidad 3% de que logre a ocurrir. Esto demuestra que la velocidad de viento que predomina es ideal para aplicaciones eólicas pequeñas, como generadores *Darrius*, *Savonius* o *Coaxiales*, que son ideales para este tipo de velocidades.

Además, la función probabilidad concluye que a una velocidad de 2.832 m/s existe una probabilidad de 40% de que el viento sea menor. Y, si hay una velocidad de 3.540 m/s existe una probabilidad de 70% de que el viento sea menor. Este resultado evidencia, que se va a tener casi un 70% de velocidades menores a 3m/s, frente a este problema, se propone estudios de proyectos de sistemas híbridos de generación de energía que aproveche el viento y la radiación solar de nuestra ubicación geográfica, dando prioridad a comunidades aisladas o zonas rurales inhóspitas.

Ahora, el resultado de densidad de potencia (22.8680 W/m^2), demuestra que los vientos en la ciudad de Jaén son aptos para turbinas de baja potencia y preferiblemente verticales; sin embargo, no se puede descartar su aplicación, debido a que es una fuente de energía eléctrica renovable. Otro punto adicional, es que el método de Weibull es necesario para poder determinar los parámetros necesarios para una evaluación energética (densidad de potencia eólica, velocidad más probable, velocidad que aporta energía máxima o poder cuantificar y calificar mediante gráficos la función densidad y probabilidad).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carrasco, J. (2023). *Potencial eólico en la provincia de Santa Cruz de Succhabamba—Departamento Cajamarca 2023*. 26(52). <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25359>
- Célestin, M., Emmanuel, L. A., Batablinè, L., y Marc, N. (2019). Spatio-Temporal Analysis of Climate Change Impact on Future Wind Power Potential in Burundi (East Africa). *American Journal of Climate Change*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2019.82014>
- Cervantes, O., Borges, A., Palmero, M., Gonsález, B., Ordóñez, E., Pérez, M., y Valdivieso, H. (2015). Predicción de velocidades y potencial eólico para alturas superiores: Estudio en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 19(2), 85-90.
- Constante, J., Cuesta, A., y Jijón, D. (2021). Métodos de ajuste de Weibull de dos parámetros en series de viento y estimación del Potencial Eolo-eléctrico. *Revista Técnica «energía»*, 17(2), 74-82. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.424>
- De Ávila, A., Pérez, D., y Jimenez, J. (2021). *Análisis del potencial eólico a través de la función de distribución de Weibull y Rosa de los vientos*. 3(1), 40-46. <https://doi.org/10.17981/ladee.03.01.2022.4>
- Eraso-Checa, F., Escobar - Rosero, E., Paz, D., y Morales, C. (2017). *Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres—Nariño*. 31(1), 19-31. <https://doi.org/10.14483/23448350.12304>
- Jamil, M., Parsa, S., y Majidi, M. (1995). Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. *Renewable Energy*, 6(5), 623-628. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00041-H](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00041-H)
- Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikail, A., y Graber, D. (1978). *Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions*. 17, 350-353. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0350:MFEWSF>2.0.CO;2)
- Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhashti, M., Khanali, M., y Abbaszadeh, R. (2010). *An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran*. 35(1), 188-201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.009>

- Khahro, S. F., Tabbassum, K., Soomro, A. M., Dong, L., y Liao, X. (2014). *Evaluation of wind power production prospective and Weibull parameter estimation methods for Babaurband, Sindh Pakistan*. 78, 956-957. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.062>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., y Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition* (2.ª ed.). WILEY.
- NASA POWER. (2024). *NASA POWER | Predicción de los recursos energéticos mundiales*. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Parajuli, A. (2016). A Statistical Analysis of Wind Speed and Power Density Based on Weibull and Rayleigh Models of Jumla, Nepal. *Energy and Power Engineering*, 8(7), Article 7. <https://doi.org/10.4236/epe.2016.87026>
- Pariacurí, B. (2024). *Estimación de la radiación solar en la ciudad de Jaén mediante el modelo matemático Bristow-Campbell* [Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/jspui/handle/UNJ/676>
- Pérez, J., Arriola, J., y Espinal, M. (2017). *Potencia aprovechable y variabilidad del viento caso típico distrito de Pimentel*. 27(2), 63-71. <http://dx.doi.org/10.21754/tecnia.v27i2.176>
- Quiñonez, J., Huanca, E., y Holguino, A. (2019). *Caracterización del recurso eólico en la ciudad de Juliaca*. 21(1), 57-68. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.445>
- Santos, D. (2019). *Energía eólica y solar fotovoltaica para generar energía eléctrica en el caserío Llushcapampa en Chota departamento de Cajamarca*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Soulouknga, M. H., Oyedepo, S. O., Doka, S. Y., y Kofane, T. C. (2017). Assessment of Wind Energy Potential in the Sudanese Zone in Chad. *Energy and Power Engineering*, 9(7), Article 7. <https://doi.org/10.4236/epe.2017.97026>
- Vera, R., y Lizana, E. (2022). *Diseño de un aerogenerador para suministro de energía eléctrica al Sector El Pongo, de la ciudad de Jaén—Perú, 2020*. Universidad Nacional de Jaén.
- Yancachajlla, U., y Vilca, O. (2022). *Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri—Perú*. 24(3), 190-198. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.439>