
Estimación del Potencial Energético Eólico para la Ciudad de Juliaca, Perú

Potential Estimation of Wind Energy in Juliaca - Peru

Ubaldo Yancachajlla Tito

ubaldoy@hotmail.com - Universidad Nacional de Juliaca

Ciro William Taipe Huaman

cwtaipe@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca

Julio Romualdo Gallegos Ramos

jgallegos@unaj.edu.pe - Universidad Nacional de Juliaca

Resumen

En el contexto actual de reconversión de la base energética, el viento es una buena fuente de energía que se viene aprovechando en muchos países del mundo. Es una fuente de energía renovable que se utiliza para la generación de electricidad, el bombeo de agua y muchas otras actividades. Pero en el Perú, en ciertas regiones, la extracción de energía eólica es más difícil debido a la baja velocidad del viento. La presente investigación trata sobre la estimación del potencial de energía eólica disponible en la ciudad de Juliaca. Los datos de viento obtenidos en la estación meteorológica del campus de la Universidad Nacional de Juliaca, ubicada en la siguiente coordenada -15.489172, -70.152718, zona urbana de Juliaca se analizan en términos de parámetros establecidos, como la distribución Weibull, la distribución de frecuencias de las direcciones del viento. Nos puede ayudar a comprender cuánta energía tenemos y cuánta energía se puede utilizar de manera fructífera.

Palabras claves: *Potencial eólico, distribución de Weibull, rosa de vientos, velocidad de viento.*

Abstract

In the current context of reconversion of energy base, wind is a good source of energy that has been used in many countries in the world. It is a renewable energy source that is used for the generation of electricity, water pumping and many other activities. But in Peru, in certain regions, the advantage taking of wind energy is more difficult due to the low wind speed. The present reseach deals with the potential wind energy available in Juliaca city. Wind data has been obtained from the Juliaca National University Meteorological Station, located at the coordinate -15.489172, -70.152718, an urban area in Juliaca; the data has been analyzed in terms of establishing parameters such as the "Weibull Distribution" as well as the "Frequency Distribution of Wind Directions". This study will help us understand how much energy we have and how much energy can be used successfully.

Keywords: *Wind potential, Weibull distribution, wind rose, wind speed.*

Introducción

La energía renovable es una fuente de energía ecológica, que se considera como la forma de energía más prometedora y útil. Existen varios tipos de recursos de energía renovable disponibles en todo el mundo, como energía solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, biogás, biocombustible e hidroeléctrica (Halder, Paul, Joardder, & Sarker, 2015). Entre ellos, la energía eólica es una de las fuentes de energía de más rápido crecimiento en todo el mundo (Ackermann & Söder, 2000). Se ha estimado que el potencial global de energía eólica total alcanzó 486.74 GW a fines del año 2016 (Sahu, 2018).

La energía eólica es una de las fuentes más prósperas de energía renovable, que se puede utilizar para generar electricidad en algunos lugares aislados. En Australia, recientemente, muchos grupos de investigación han investigado diferentes ideas y técnicas innovadoras para pronosticar datos del viento y desarrollar formas más eficientes de extraer la energía del viento (Liu, Mi, & Li, 2018; Moreno & dos Santos Coelho, 2018; Vogel, Saravia, Kobe, Schumann, & Schuster, 2018).

El análisis de los datos del viento se considera como el primer paso para la identificación de los posibles emplazamientos eólicos. En la literatura, los investigadores utilizaron un enfoque diferente para encontrar el emplazamiento eólico más prospectivo. Hasta la fecha, la distribución de Weibull es el modelo matemático más ampliamente investigado utilizado para la estimación de la energía eólica disponible (Wais, 2017). Por ejemplo, Azad y sus colaboradores, describieron el diagnóstico estadístico de los mejores métodos de Weibull para la evaluación de la energía eólica (Abul Kalam Azad, Rasul, & Yusaf, 2014). Según los autores, existen siete métodos diferentes, como el método de densidad de potencia, el método de máxima verosimilitud, el método de momentos, el método de desviación estándar, el método gráfico, el método de máxima verosimilitud modificada y el método de equivalente de energía utilizado para la estimación de los parámetros de Weibull. Descubrieron que el método del momento y el método de máxima verosimilitud eran los métodos más adecuados para la estimación del valor k y el valor c que se ajustaban mejor a la curva de distribución de Weibull. Además, Akpinar y Akpinar llevaron a cabo una investigación similar utilizando un enfoque estadístico para analizar los datos de velocidad del viento para la instalación de sistemas de conversión de energía eólica (Kavak Akpinar & Akpinar, 2005).

En este estudio, se analizaron estadísticamente los datos de la velocidad media del viento por hora para el emplazamiento. Keban-Elazig utilizando los modelos de Weibull y Rayleigh. Encontraron que la distribución de Weibull proporcionó mejores estimaciones de densidad de potencia a lo largo de los 12 meses que la distribución de Rayleigh. Además, Parajuli (Parajuli, 2016) también se analizó la velocidad del viento y la densidad de potencia según los modelos de Weibull y Rayleigh de Jumla, Nepal. En este estudio, el autor analizó estadísticamente los datos de la velocidad del viento media diaria durante 10 años del período. El autor derivó la distribución de

densidad de probabilidad y la densidad de potencia a partir de datos de series de tiempo. El resultado del estudio indicó que la distribución de Weibull se ajustaba mejor a la distribución de probabilidad medida que la distribución de Rayleigh. En otro estudio, Azad y Saha llevaron a cabo el análisis de Weibull sobre el potencial de la energía eólica en los emplazamientos costeros (A K Azad & Saha, 2011).

Los autores recopilaron datos de velocidad del viento en intervalos de 10 minutos a 20 m de altura desde el suelo para diferentes emplazamientos. Los datos se organizaron en una secuencia adecuada, por ejemplo, por hora, día, mes y año. El resultado del estudio indicó que la función de densidad de probabilidad $F(v)$ y la función de distribución acumulada $f(v)$ para los datos observados y los datos calculados se ajustaron estrechamente entre sí, lo que indica la idoneidad del emplazamiento para la generación de electricidad. Khan et al. realizó un análisis similar de Weibull sobre el potencial de la energía eólica de tres regiones diferentes en Bangladesh (Khan, Halder, & Rahman, 2014). La distribución de Weibull se empleó en algunos otros estudios más recientes para analizar los datos del viento, estimar el factor de forma y escala, y evaluar el potencial de la energía eólica en diferentes emplazamientos eólicos de Chad, Turquía y Egipto (Kaplan, 2018; Soulouknga, Doka, N.Revanna, N.Djongyang, & T.C.Kofane, 2018). El diseño de la turbina eólica para la elección del emplazamiento también es crucial para la generación de energía eólica sostenible. Normalmente, hay dos tipos de turbinas eólicas disponibles, como la turbina eólica de eje vertical y la turbina eólica de eje horizontal. Una turbina eólica de eje horizontal es la más utilizada para la extracción de energía eólica comercial.

La generación de energía del aerogenerador varía según los diferentes tamaños de forma y tamaño de la pala de la turbina (A. K. Azad & Kaysar, 2012).

En Perú se han establecido diversos mecanismos para promover la participación de las energías renovables en la generación. La ley 29157 de 2010 tiene como objetivo "promover la inversión en la generación de electricidad con el uso de fuentes de energía renovable" estimar los recursos energéticos renovables aprovechables en el territorio peruano. En el presente artículo se realiza la estimación del potencial eólico en Juliaca, determinando si es viable el emplazamiento para un aerogenerador.

Materiales y Métodos

Para la estimación del potencial eólico en un lugar es necesario los siguientes datos: presión atmosférica, temperatura del lugar, altura sobre el nivel del mar y velocidad del viento, entre otros, por esta razón los datos serán tomados de la estación meteorológica del campus de la Universidad Nacional de Juliaca.

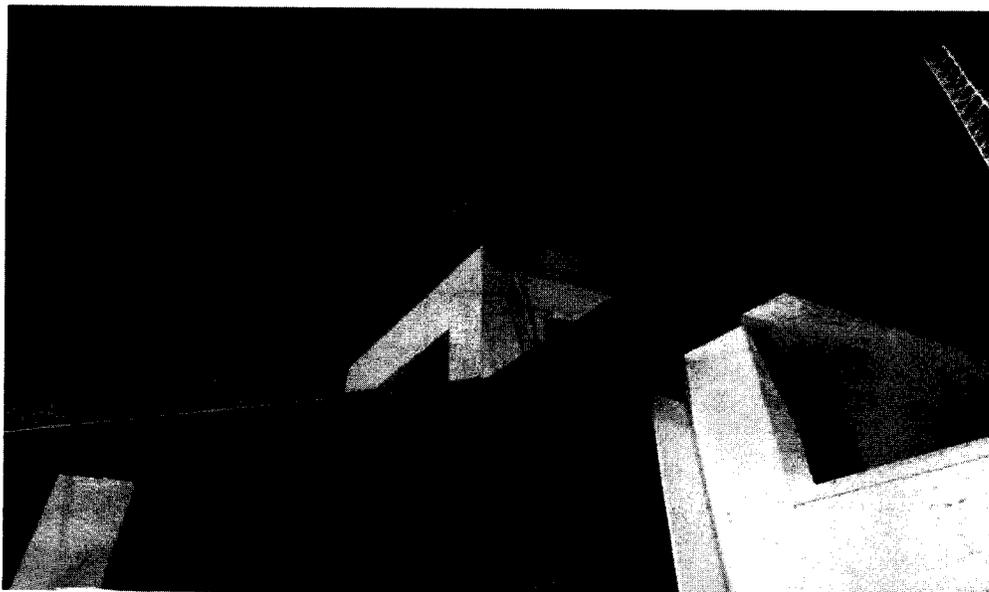


Figura 1. Estación meteorológica instalada en el Campus de la Universidad Nacional de Juliaca.

La distribución de Weibull y la rosa de los vientos nos permite estimar el potencial eólico y determinar qué tipo de aerogenerador es el adecuado.

Se realiza un histograma con la ayuda del software Wrplot, el número óptimo de clases, está dado por la regla de Sturges, descrita a continuación:

$$\text{No. Clases} = 1 + 3.32 \log(N) \quad (1)$$

Dónde: N, es el número de datos de la muestra.

Distribución de Weibull

La distribución de Weibull se caracteriza por dos parámetros como el parámetro de forma k (sin dimensiones) y el parámetro de escala c (m/s)

La función de densidad de Weibull (densidad de probabilidad) está dada por

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-(v/c)^k} \quad (2)$$

Donde: v , velocidad del viento (m/s)

En la Figura 2, se muestra gráficas de Weibull para distintos valores del parámetro k ,

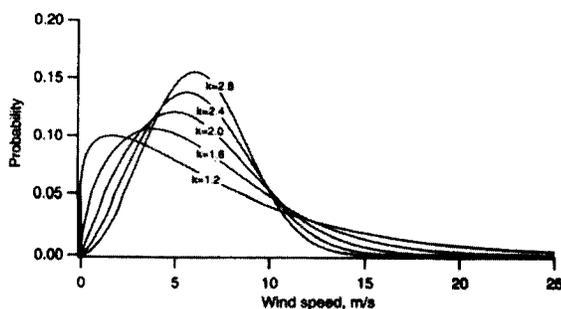


Figura 2. Densidad de probabilidad de la velocidad para Weibull para varios valores de k . (López, 2012).

Los mínimos cuadrados es un método que permite estimar los parámetros de la función Weibull, para lo cual se realiza de la siguiente manera:

Se calcula y_i y x_i del siguiente modo:

$$y_i = \ln(\ln(1 - F_i)) \quad (3)$$

$$x_i = \ln(v_i) \quad (4)$$

Donde:

(v_i) las clases del histograma

(f_i) la frecuencia relativa

(F_i) frecuencia relativa acumulada.

Luego, se calculan los valores de A y B

$$A = \frac{\sum f_i x_i y_i - (\sum f_i x_i)(\sum f_i y_i)}{\sum f_i x_i^2 - (\sum f_i x_i)^2} \quad (5)$$

$$B = f_i y_i - \sum f_i x_i \quad (6)$$

Se calcula k y c ,

$$k = A \quad (7)$$

$$c = e^{-(B/A)} \text{ m/s} \quad (8)$$

Densidad del aire

Para estimar la densidad del aire puede determinarse de forma indirecta conociendo la temperatura, altura sobre el nivel del mar:

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{T+273}\right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (9)$$

Donde ρ - densidad del aire, h - altura del lugar de estudio y T - temperatura del lugar.

Potencial energético disponible

La potencia eólica disponible.

$$P_d = \frac{1}{2} \rho F_e v^3 A \quad (10)$$

La densidad de potencia disponible por unidad de área.

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho F_e v^3 \quad (11)$$

dónde: P_d , - potencial eólico (w/m^2), A - área(m^2), ρ - densidad del aire(kg/m^3), v el valor promedio de velocidad (m/s) y F_e el factor de potencia eólica o factor de energía, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$F_e^{1/3} = \frac{\hat{v}}{v} \quad (12)$$

El término del numerador se halla elevando primero las velocidades instantáneas al cubo y luego se calcula el promedio de este valor. El denominador es el promedio de las velocidades elevado al cubo.

Rosa de los vientos

Un diagrama de rosa de los vientos es una herramienta que muestra gráficamente la velocidad del viento y la dirección del viento en un lugar en particular durante un período de tiempo.

Resultados y discusión

Se utilizaron los datos obtenidos de la estación meteorológica Universidad Nacional de Juliaca, la cual está configurada para tomar muestras cada hora; se utilizó el programa MATLAB obteniendo los siguientes resultados para los meses de enero hasta agosto.

Velocidad del viento

Para los meses enero hasta agosto del año 2018 se tiene un total de 5831 datos, el tiempo de muestreo es de una hora entre mediciones, según la regla de Sturges el número de clases óptimo será:

$$No. Clases = 1 + 3.32 \log(5831) = 13.5 \dots(13)$$

La velocidad media del viento y la desviación típica de la muestra es.

$$\hat{v} = 2.27515m/s \dots(14)$$

$$\sigma = 1.902018 m/s \dots(15)$$

En la Figura 3 se observa el histograma de los datos de la estación meteorológica. La velocidad media y desviación típica se encuentran entre $0.50 m/s$ y $3.60/s$.

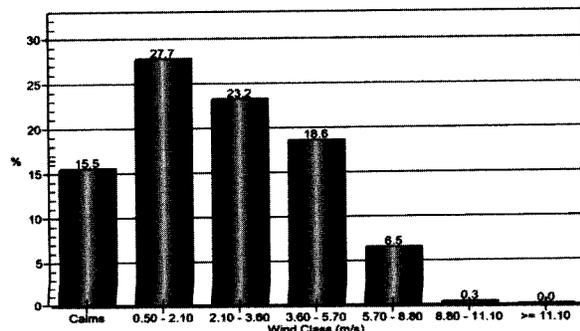
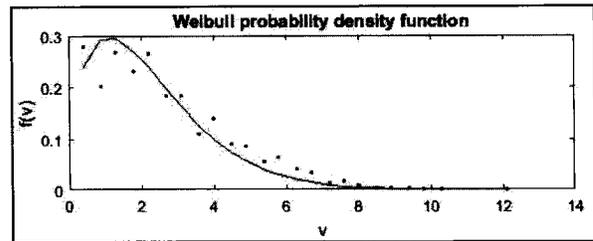
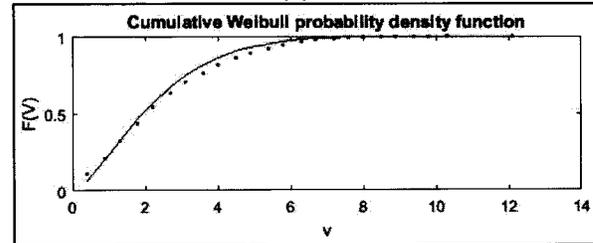


Figura 3. Distribución de Weibull para enero hasta agosto 2018.



(a)



(b)

Figura 4. (a) Función de densidad de probabilidad de Weibull; (b) Función de densidad de probabilidad de Weibull acumulada.

Los parámetros de forma y escala calculados son:

$$k = 1.4526 m/s \dots(16)$$

$$c = 2.4973 m/s \dots(17)$$

El valor del factor de forma k , es un valor que indica que la gráfica de la distribución de Weibull no es tan asimétrica; adicionalmente, el factor de escala c , es una velocidad cercana a la velocidad media.

Densidad de viento

Los datos registrados por la estación meteorológica temperatura y presión:

$$T_{promedio} = 9.55 \text{ } ^\circ\text{C} \dots(18)$$

$$P_{promedio} = 640.2 \text{ mBar} \dots(19)$$

La altura en metros sobre el nivel del mar:

$$h = 3825 \text{ m s. n. m.} \dots(20)$$

Entonces la densidad es calculada con la ecuación,

$$\rho = 1.225 \left(\frac{288}{9.55+273} \right) e^{-\left(\frac{3825}{8435} \right)} \dots(21)$$

$$\rho = 0.7934 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \dots(22)$$

Potencial energético del viento

Se halla el factor de energía:

$$F_e = \frac{42.585}{11.777} = 3.62 \dots(23)$$

Luego se halla la densidad de potencia eólica:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} * 0.7934 * 3.62 * 2.27515^3 \dots(24)$$

$$\frac{P_d}{A} = 16.912 \text{ W/m}^2 \dots(25)$$

Realizados los cálculos para la estación ubicada en las instalaciones de la Universidad Nacional de Juliaca, se tiene una velocidad promedio media de 2.27515 m/s y una densidad de potencia eólica de 3.2636 W/m². Estos valores se corroboran con el atlas eólico del Perú (Vidal Perez, 2008).

Para efectos de cálculo se supone un aerogenerador BLACK 300 cuyas características técnicas se ven en la Tabla 1

Tabla 1.
Características aerogenerador BLACK 300

Hélice	3 hojas
Material	Carbón-Nylon
Diámetro de rotor	1.22 m
Generador	Permanente, Direct Drive
Voltaje	12V DC (24V, 48V disponible)
Rendimiento a 9.36 m/s	343 W (max. 450 a 12 m/s)
Velocidad mínima para cargar	1.8 m/s
Peso de generador	15 kg
Medidas y peso del paquete	70cm*40cm*21cm (18Kg)
Área	1.17 m ²
Potencia nominal	343 W

Finalmente se remplazan los resultados obtenidos en la siguiente ecuación, para determinar el potencial eólico.

$$P_d = 3.2636 * A$$

$$P_d = 16.912 * 1.17$$

$$P_d = 19.78 W$$

La potencia alcanzada utilizando un aerogenerador Black 300 en el campus de la Universidad Nacional de Juliaca es de 19.78 W

Dirección de viento

Se observa en la Figura 5 que existe una dirección dominante entre 247.5° con 584 frecuencias, 270° con 550 frecuencias y 315° con 522 frecuencias.

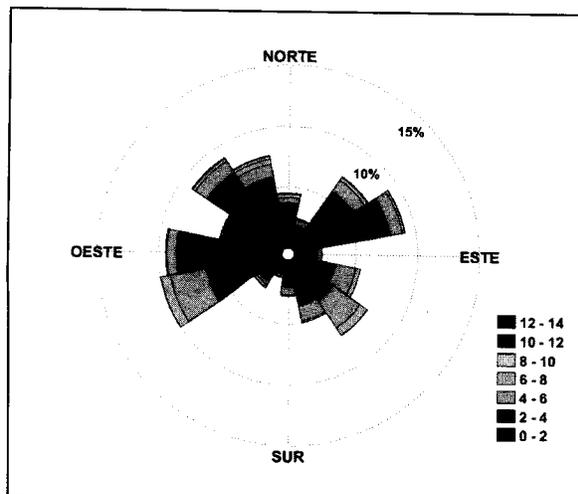


Figura 5. Rosa de los vientos enero hasta agosto

Conclusiones

El valor estimado del factor de forma de la distribución de Weibull k, es 1.4526. Es un valor que indica que la gráfica de la distribución de Weibull no es tan asimétrica, pero es menor que 2. También se observa que, el factor de escala c, tiene un valor cercano a la media

Realizada la estimación del potencial eólico en Juliaca, determina el potencial energético del lugar un valor de 16.912 W/m², lo cual es un valor pequeño y no es poco viable.

La velocidad promedio del viento es de 2.27515 m/s. También se tiene que la velocidad del viento no es constante y la direcciones de estas varían (existe una dirección dominante alrededor entre 247.5° con 584 frecuencias, 270° con 550 frecuencias y 315° con 522 frecuencias).

Para un aerogenerador BLACK 300 que requiere una velocidad de arranque mínima 1.8m/s, con una potencia nominal de 343W, para la densidad de potencia eólica de 16.912W/m² y el radio del rotor es de 1.22m, se obtiene una potencia de 19,78W, el cual está muy por debajo del valor nominal de la turbina eólica back 300.

Referencias bibliográficas

- Ackermann, T., & Söder, L. (2000). Wind energy technology and current status: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(4), 315–374. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(00\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(00)00004-6)
- Ahmed, N. A., & Cameron, M. (2014). The challenges and possible solutions of horizontal axis wind turbines as a clean energy solution for the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 439–460. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.06.004>
- Azad, A. K., & Kaysar, M. M. (2012). Design of a Horizontal Axis Wind Turbine for Electricity Generation in Low Speed Windy Sites. *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, 1(6), 363–373.
- Azad, A K, & Saha, M. (2011). Weibull's Analysis of Wind Power Potential at Coastal Sites in Kuakata, Bangladesh. *International Journal of Energy Machinery*, 4(1), 36–45.
- Azad, Abul Kalam, Rasul, M. G., & Yusaf, T. (2014). Statistical diagnosis of the best weibull methods for wind power assessment for agricultural applications. *Energies*, 7(5), 3056–3085. <https://doi.org/10.3390/en7053056>
- Halder, P. K., Paul, N., Joardder, M. U. H., & Sarker, M. (2015). Energy scarcity and potential of renewable energy in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51(April 2018), 1636–1649. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.069>
- Kaplan, Y. A. (2018). Performance assessment of Power Density Method for determining the Weibull Distribution Coefficients at three different locations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 63, 8–13. <https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASINST.2018.07.004>
- Kavak Akpınar, E., & Akpınar, S. (2005). A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems. *Energy Conversion and Management*, 46(4), 515–532. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2004.05.002>
- Khan, P. A., Halder, P. K., & Rahman, S. (2014). Wind energy potential estimation for different regions of Bangladesh, 3(3), 47–52. <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20140303.11>
- Liu, H., Mi, X., & Li, Y. (2018). An experimental investigation of three new hybrid wind speed forecasting models using multi-decomposing strategy and ELM algorithm. *Renewable Energy*, 123, 694–705. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.02.092>
- López, M. V. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Marcombo.
- Moreno, S. R., & dos Santos Coelho, L. (2018). Wind speed forecasting approach based on Singular Spectrum Analysis and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Renewable Energy*, 126, 736–754. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.11.089>
- Parajuli, A. (2016). A Statistical Analysis of Wind Speed and Power Density Based on Weibull and Rayleigh Models of Jumla , Nepal, (July), 271–282.
- Sahu, B. K. (2018). Wind energy developments and policies in China: A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1393–1405. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.183>
- Soulouknga, M. H., Doka, S. Y., N.Revanna, N.Djongyang, & T.C.Kofane. (2018). Analysis of wind speed data and wind energy potential in Faya-Largeau, Chad, using Weibull distribution. *Renewable Energy*, 121, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.002>
- Vidal Perez, J. (2008). Atlas Eólico del Perú, 87. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0176-1>
- Vogel, E. E., Saravia, G., Kobe, S., Schumann, R., & Schuster, R. (2018). A novel method to optimize electricity generation from wind energy. *Renewable Energy*, 126, 724–735. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.03.064>
- Wais, P. (2017). A review of Weibull functions in wind sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1099–1107. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.12.014>