

Caracterización del recurso eólico en la ciudad de Juliaca

Characterization of the Wind Resource in the city of Juliaca

José Quiñonez Choquecota^{1*}, Elmer Huanca Callata², Antonio Holguino Huarza¹

¹Departamento Académico de Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú

²Escuela Profesional de Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú

*Autor para correspondencia e-mail: josequch@gmail.com

REPORTE DE CASO

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido: 01/10/2018

Artículo aceptado: 31/12/2018

En línea: 26/02/2019

PALABRA CLAVES:

caracterización del recurso eólico,
distribución de Weibull,
energías renovables,
potencial eólico,
recurso eólico

CASE REPORT

ARTICLE INFORMATION

Article received: 08/08/2018

Article accepted: 28/12/2018

On line: 26/02/2019

KEYWORD

Characterization of the wind
resource,
renewable energies,
Weibull distribution,
wind resource,
wind potential

RESUMEN

El trabajo se realizó una evaluación cuantitativa y cualitativa del recurso eólico con el objetivo de caracterizar el potencial explotable del recurso eólico en el contorno de la ciudad de Juliaca de la región de Puno. Se analizaron los datos proporcionados de los años 2013-2014 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, de la estación ubicada en esta ciudad, para comparar con la base de datos de la NASA (Surface Meteorology and Solar Energy. SSE, 2012). El análisis cuantitativo consistente en la caracterización de la velocidad media horaria y media mensual del viento para una altura de 25 m del suelo, al comparar las velocidades medias mensuales de la NASA y del SENAMHI se observa una diferencia promedio de 8.93% durante los meses de primavera y verano, donde además el viento supera los 3 m/s, y que las direcciones predominantes del viento es el oeste y el este. El análisis cualitativo corresponde a la estimación del potencial eólico el cual se realizó con la distribución de Weibull, obteniéndose una densidad de potencia media anual a 25 m del suelo de 15.91 W/m², para 50 m este potencial se duplica. En definitiva, en la ciudad de Juliaca se pueden implementar generadores eólicos de pequeña potencia, ya que el recurso eólico no es abundante y tiene dirección variable. La caracterización realizada con los datos de la NASA y del SENAMHI son similares, por lo que, los datos de la NASA son confiables para caracterizar el recurso eólico de la ciudad de Juliaca.

ABSTRACT

In the present paper, a quantitative and qualitative evaluation of the wind resource was carried out in order to characterize the exploitable potential of the wind resource in the area around the city of Juliaca in the Puno region. The data provided for the years 2013-2014 by the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru - SENAMHI, of the station located in this city, were analyzed to compare with the database of NASA (Surface Meteorology and Solar Energy. SSE, 2012). The quantitative analysis consisting of the characterization of the average hourly and monthly wind speed for a height of 25 m above the ground, comparing the average monthly speeds of NASA and SENAMHI, shows an average difference of 8.93% during the months of spring and summer, where the wind also exceeds 3 m/s, and the predominant directions of the wind is the west and the east. The qualitative analysis corresponds to the estimation of the wind potential which was carried out with the Weibull distribution, obtaining an average annual power density at 25 m from the ground of 15.91 W/m², for 50 m this potential is doubled. In short, in the city of Juliaca small wind power generators can be implemented, since the wind resource is not abundant and has variable direction. The characterization made with data from NASA and SENAMHI are similar, therefore, NASA data are reliable to characterize the wind resource of the city of Juliaca.

INTRODUCCIÓN

La demanda de la energía a nivel mundial crece con el transcurso de los años y el desarrollo de un país está directamente relacionado con el uso de la energía eléctrica. Para ello las fuentes de energías renovables son la alternativa energética que puede satisfacer la demanda energética, sin contribuir a la contaminación ambiental y el cambio climático (Guo et al., 2018) (Carta, González & Subiela, 2009).

Las fuentes de energía eólica proporcionan posibilidades de abastecimiento de energía renovable sustentable y limpia para las generaciones futuras (Chu & Majumdar, 2012). La magnitud de dicha contribución y la viabilidad económica de su implantación, depende de las particularidades tales como el estudio del potencial explotable de los recursos, su localización geográfica y las características de los mercados energéticos (Lucano y Fuentes, 2010). La instalación de parques eólicos a gran escala tiene un impacto potencial negativo sobre las condiciones climáticas (Li, 2018), sin embargo para instalaciones cerca de la urbe, las turbinas eólica descentralizadas a pequeña escala son una opción sostenible con aerogeneradores de eje horizontal y eje vertical (Tummala, Velamati, Sinha, Indraja & Krishna, 2016).

La ciudad de Juliaca se encuentra en el altiplano peruano en donde los vientos son regularmente constantes, que en la actualidad no son aprovechados para uso directo a través de la transformación a energías eléctricas (Carta, González, et al., 2009). La mayoría de su población de sus alrededores tiene problemas del suministro de agua potable. Este recurso hídrico es extraído del subsuelo y algunos pobladores no cuentan con energía eléctrica para realizar esta actividad. El uso de las energías renovables en nuestro país, requiere manejo de información actualizada sobre las características de los recursos energéticos renovables disponibles en el área geográfica de uso, tanto para la electrificación de zonas rurales como para el bombeo de agua del

subsuelo y otras aplicaciones (Peralta-Jaramillo, 2015).

En diversos lugares del mundo como en Turquía tiene que hacerse uso de los recursos de energía renovable, como la eólica y la solar, no solo para satisfacer la creciente demanda de energía, sino también por razones medioambientales (Celik, 2004).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar el potencial explotable del recurso eólico de la ciudad de Juliaca que pertenece a la provincia de San Román de la región de Puno. La caracterización del recurso eólico permitirá desarrollar proyectos como bombeo de aguas subterráneas, generación de la energía eléctrica para zonas circundantes y aisladas de Juliaca u otros proyectos productivos que requieran uso de energías sustentables, provenientes los recursos eólicos. Además, permitirá aportar la elaboración del mapa eólico para la región de Puno, que es necesaria para la implementación de proyectos con energía eólica (Hualpa, 2006). La caracterización del recurso eólico es necesario en la planificación de un proyecto de energía eólica (Laiola & Giungato, 2017) y se necesita un conocimiento detallado de la característica del viento en un sitio para estimar el rendimiento de un proyecto de energía eólica (Islam, Saidur & Rahim, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Adquisición de datos

La ciudad de Juliaca se sitúa a 3826 m.s.n.m. en la meseta del Collao, al noroeste del lago Titicaca. Es un centro económico importante de la región Puno y del Perú. Se ubica entre la laguna de Chacas, Lago Titicaca y río Maravillas.

El estudio se realizó con datos proporcionados por la Estación Meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica - Puno (SENAMHI-Puno, 2013) ubicada en la ciudad de Juliaca, latitud sur 15° 28' 28", longitud oeste 70° 10' 10", de los

años 2013 -2014, y la base de datos meteorológicos de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Ermolenko, Ermolenko, Fetisova & Proskuryakova, 2017). Los datos correspondientes a la velocidad y dirección del viento han sido medidos por el anemómetro CAM RC-400, Con los datos estadísticos obtenidos y el software Excel 2013, se han determinado las tendencias mensuales del promedio de la velocidad del viento durante todo el tiempo indicado, la dirección predominante del viento en el que se hace la rosa de viento para la zona y las velocidades extrapoladas a diferentes alturas del suelo (De Borotoli, M. E. Canavasio, O. Benitez, 2002).

Con los datos de velocidad del viento y dirección viento horario y presión atmosférica obtenidos por la Estación Meteorológica del SENAMHI y la NASA, se hizo la caracterización del recurso eólico, que contempla los cálculos de la velocidad del viento horario mensual y anual. Con los datos de la velocidad del viento, se estimó la potencia explotable de la energía eólica se estimó con la función de densidad de probabilidad de Weibull, siendo esta una variable independiente conjuntamente con la dirección que ha sido estimado con la rosa de viento (Elamouri & Ben Amar, 2008).

Densidad de potencia eólica

Para la elaboración de los proyectos de instalación de turbinas eólicas se necesita conocer la velocidad del viento a la altura del eje del rotor, que generalmente se ubica en la una torre elevada, por lo es necesario extrapolar la velocidad del viento para diferentes alturas mediante la ecuación (Carta, González, et al., 2009).

$$v = v_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde h representa a la altura donde se desea conocer la velocidad (v), y v_o es la velocidad conocida a la altura de referencia h_o . El coeficiente de rugosidad α varía con la altura, hora del día,

estación del año, naturaleza del terreno, velocidad del viento y temperatura. Tomando como altura de referencia igual a 10 metros, el coeficiente α toma diferentes valores con el tipo de terreno. El distrito de Juliaca, presenta un coeficiente de rugosidad que varía entre 0.2 y 0.25 por ser un espacio que cuenta con edificaciones de diferente escala. En este trabajo se utilizó el coeficiente de rugosidad igual $\alpha = 0.2$ (Stackhouse y Whitlock, 2008).

El análisis cualitativo se hizo con la distribución de Weibull para el recurso eólico, determinándose las densidades de potencias mensual y anuales a diferentes alturas (Lorenzo et al., 2016). Una de las formas más comunes para analizar los datos de velocidad de viento y elaborar estudios sobre energías renovables basados en energía eólica, es hacerlo mediante una función de densidad de probabilidad de Weibull, o simplemente distribución de Weibull (Nuñez & Rodríguez, R., Pierra, A., Reyes, 2014). La función de densidad de probabilidad de Weibull de dos parámetros para la velocidad del viento está dada por la ecuación (Carta, González, et al., 2009).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}; k > 0, v > 0, c > 1 \quad (2)$$

Donde, c se denomina parámetro de escala y k es el factor de forma. El factor de forma se determina con $k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086}; 1 \leq k \leq 10$ Siendo \bar{v} la velocidad media del viento y σ es la desviación estándar de la función de distribución, está representado en la varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \quad \text{Mientras tanto el parámetro de escala está dado por } c = \frac{\bar{v}}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

La velocidad media \bar{v} puede ser representado en términos de la función Gamma, dado por:

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

La potencia media del viento se define por:

$$\bar{p}w = \frac{1}{2} \rho A \int_0^\infty v^3 f(v) dv \quad (4)$$

Que puede ser representado en términos de la función gamma por:

$$\overline{pw} = \frac{1}{2} \rho A \frac{\overline{v}^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^3} \quad (5)$$

Donde A representa el área de barrido del viento. La densidad de la potencia del viento está dada por $\frac{\overline{pw}}{A}$. Para determinar la densidad de potencia media, es necesario conocer el valor de la densidad media del viento, esta cantidad varía con la altitud.

La densidad media del aire que constituye al viento o ratio de la densidad de aire está dado por:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{Bh}{T_0}\right)^{g/RB} \left(\frac{T_0}{T_0 - Bh}\right) \quad (6)$$

Donde la presión y temperaturas iniciales en condiciones normales tienen valores de $P_0 = 101.325$

Pa y , $T_0 = 288.16 K$, $B = 0.0065 K/m$ y $R = 8.315/ molK$ (Lucano y Fuentes, 2010).

RESULTADOS

Para la caracterización de la velocidad del viento en la ciudad de Juliaca por el periodo de dos años, se analizaron un total de 8367 datos registrados del año 2013 y 8353 datos del año 2014, datos que corresponden a la medida de la magnitud y dirección de la velocidad realizada por la estación meteorológica del SENAMHI. La información recopilada fue ordenada por horas y meses de modo que se han determinado las velocidades promedio horarios, velocidades promedio mensuales, velocidades máximas y mínimas y las tendencias mensuales de la velocidad del viento (Figuras 1 y 2).

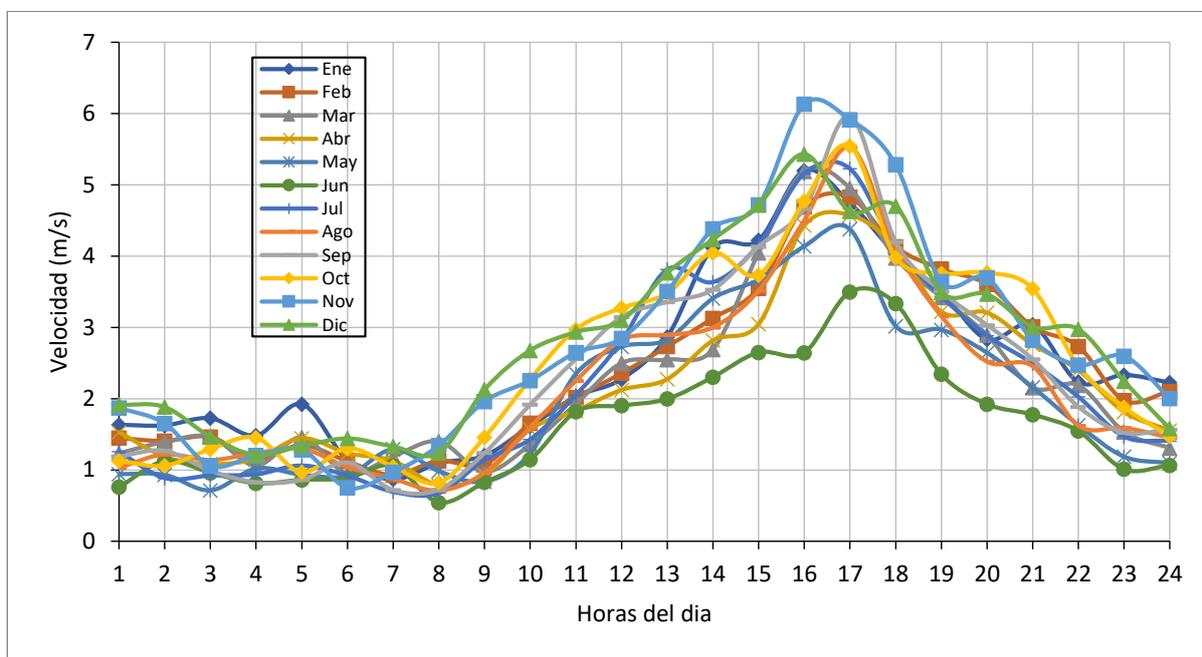


Figura 1. Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura del año 2013.

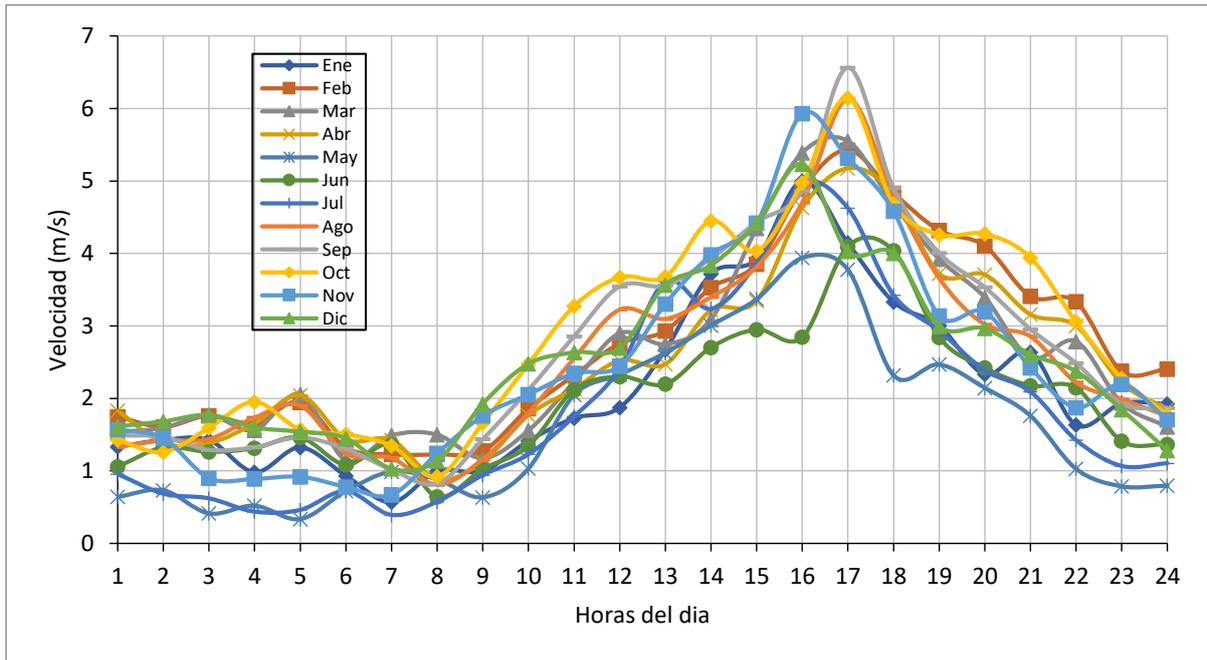


Figura 2. Tendencias mensuales horarias de la velocidad del viento para la ciudad de Juliaca a 10 m de altura del año 2014.

Examinando las anteriores figuras (Figura 1 y 2) se identifica que las velocidades máximas del viento se presentan entre las 14:00 y 18:00 horas y las velocidades mínimas entre las 3:00 y 8:00 horas. Otra de las características es que el recurso eólico es aleatorio y muy variable. Existe mayor recurso eólico en los meses de primavera y verano y el recurso es mínimo en los meses de otoño e invierno. Por otro

lado, se observa que la velocidad promedio mensual del viento está entre 2 y 3 m/s y las velocidades máximas alcanzadas fueron de 6.56 m/s en el mes de septiembre del año 2014 (Figura 3). Así pues, se aprecia mayor variabilidad del recurso eólico en los meses de mayor recurso eólico alcanzando un rango de variación de hasta 5 m/s.

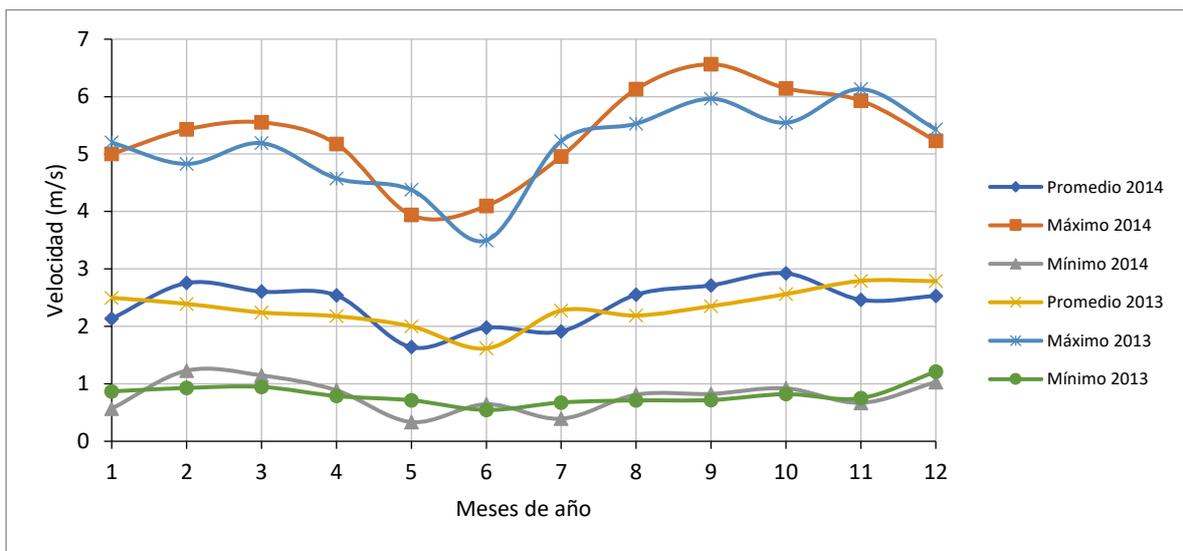


Figura 3. Rango de variación de la velocidad promedio mensual del viento a 10 m de altura.

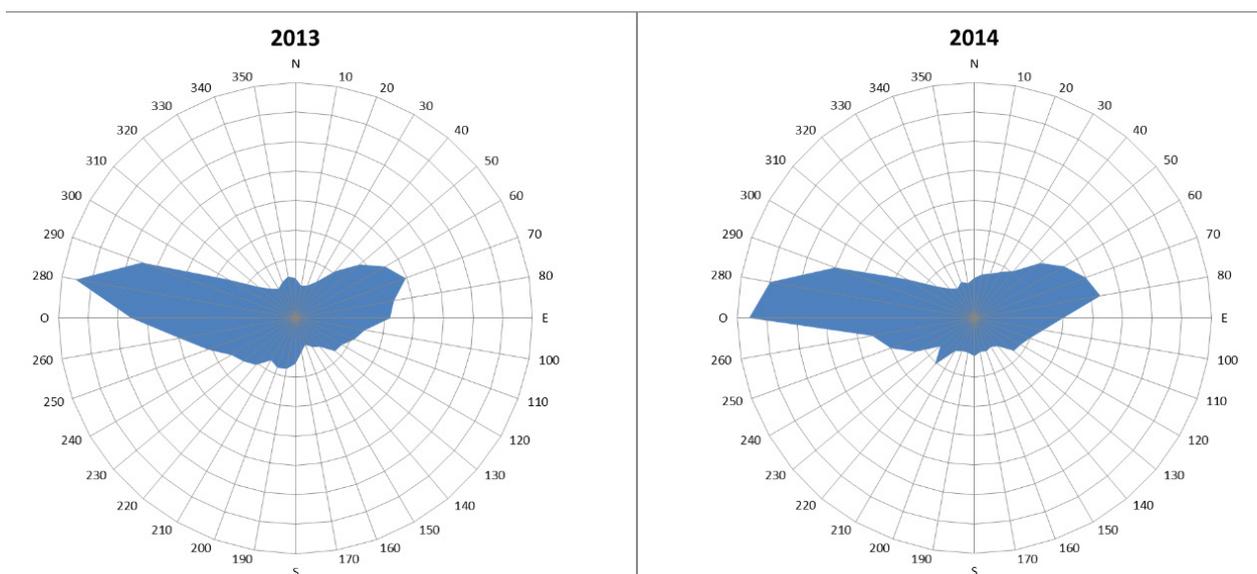


Figura 4. Rosa de vientos para la ciudad de Juliaca para los años 2013 y 2014.

El análisis de la dirección del viento se realizó elaborando la rosa del viento con los datos de la dirección del viento promedio horario, medido por la estación meteorológica en los dos años. Al realizar la rosa de viento (Figura 4) se observa que la dirección predominante del viento resulta ser mayormente el oeste y el este.

Los resultados del SENAMHI que son valores de las velocidades promedios mensuales del viento a una altura de 10 m del suelo, se procede a extrapolar para una altura de 25 m sobre el suelo para los dos años con la ecuación (1). Luego al tomar el promedio mensual de los dos años se procede a comparar con los datos de la NASA, que son los valores de las velocidades promedios mensuales del viento a una altura de 25 m del suelo, tomados por un periodo de 10 años correspondiente a la cuadrícula de la ciudad de Juliaca. Al comparar ambos resultados de la velocidad promedio, la diferencia media es de 8.93% en los meses en donde existe mayor recurso eólico, entre los meses de enero a abril se registra menores diferencias, mientras tanto entre los meses de mayo a agosto se registra las mayores diferencias llegando hasta 58 % en el mes de junio (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de la velocidad del viento promedio entre resultados de la SENAMHI Y NASA para Latitud 15.44°S y Longitud 70.21°O, valores en m/s a 25 m de altura.

Mes	SENAMHI	NASA	Diferencia (%)
Ene	2.78	2.76	0.82
Feb	3.09	2.82	8.77
Mar	2.91	2.71	6.89
Abr	2.83	2.82	0.41
May	2.19	3.09	41.41
Jun	2.16	3.41	57.92
Jul	2.52	3.61	43.48
Ago	2.85	3.38	18.70
Sep	3.04	3.38	11.06
Oct	3.29	3.15	4.39
Nov	3.16	3.02	4.30
Dic	3.19	2.90	9.19
Promedio	2.83	3.09	8.93

Con los 16720 valores de la velocidad horaria de los dos años, se obtienen, los valores del factor de forma de la distribución de Weibull que fue γ y el parámetro de escala $c = 3.19$ m/s para una altura de 25 m sobre el suelo en donde la velocidad media anual del viento es de 2.83 m/s. Con los parámetros calculados y usando la ecuación (2) logra determinar la función de distribución de probabilidad de Weibull. Las

funciones de probabilidad de Weibull para alturas de 10 y 25 metros (Figura 5), tienen formas estrechas. Estas formas de gráficas indican que se tendrá una alta variación de velocidades del viento con mayor probabilidad de que se presente bajas velocidades,

dicho de otra manera, se tiene una mayor probabilidad de que la velocidad promedio anual del viento a presentarse sean bajas, de forma que para una altura de 10 m se tendría una velocidad de 0.7 m/s y para una altura de 25 m de 2.5 m/s.

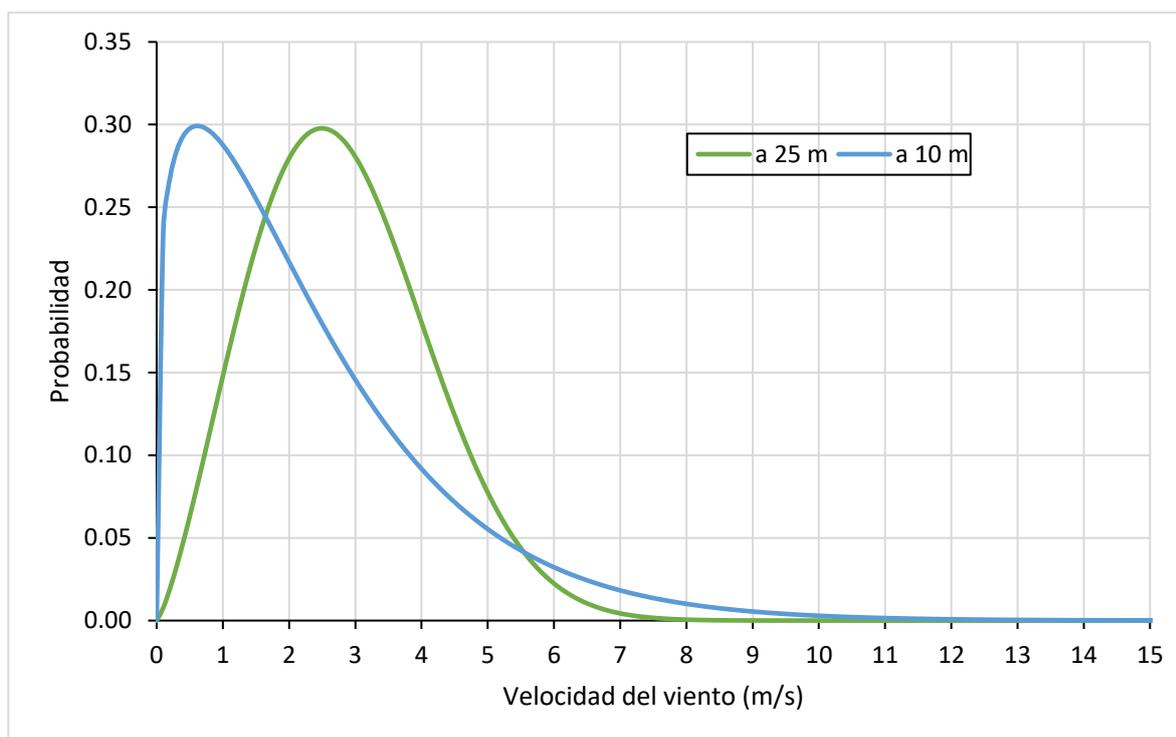


Figura 5. Función de probabilidad de Weibull anual a altura de 10 y 25 metros del suelo.

Para determinar la densidad media de potencia fue necesario calcular la densidad media del aire a una altura de 2826 m.s.n.m. que fue de $\rho = 0.832 \text{ kg/m}^3$ que corresponde para la ciudad de Juliaca, luego haciendo uso de la ecuación (5) se determinó los valores mensuales de la densidad de potencia del recurso eólico explotable (Tabla 2). De los resultados es importante destacar que, se tendrá mayor potencial explotable en los meses de febrero, setiembre, octubre, noviembre y diciembre, y los meses de escaso recurso eólico son mayo y junio, y el potencial explotable promedio anual sería de 199.7 W/m^2 .

Tabla 2. Velocidad media y densidad de potencia mensual a 25 m de altura.

Mes	v (m/s)	$P_w(\text{W/m}^2)$
Ene	2.78	15.01
Feb	3.09	20.06
Mar	2.91	17.23
Abr	2.83	15.86
May	2.19	7.29
Jun	2.16	7.03
Jul	2.51	11.13
Ago	2.85	16.13
Sep	3.04	19.69
Oct	3.29	24.99
Nov	3.16	21.96
Dic	3.19	22.75
Promedio	2.83	15.91
Total		199.69

Por otro lado, uno aspecto significativo en el estudio del recurso eólico es determinar la variación del viento y la densidad de potencia con la altura desde el suelo, dado que los aerogeneradores se instalan para distintas necesidades de suministro. Al calcular los resultados (Tabla 3), observamos el aumento abrupto de la densidad de potencia y la velocidad media con la altura, esto sucede debido a que la potencia depende de cubo de la velocidad, un ejemplo es

que la potencia duplica su valor a una altura de 50 metros con respecto al de 10 metros. Otro punto importante a destacar es que para un aerogenerador con velocidad de arranque mayor o igual a 3 m/s se tendrá un porcentaje de operación no tan prometedor a bajas alturas, en particular para una altura de 25 m se tendrá un porcentaje de operación anual del 40 % de la turbina, es decir más de la mitad del año no funcionara el aerogenerador.

Tabla 3. Variación de la velocidad media y la densidad de potencia con la altura.

Altura (m)	(m/s)	k	c	P_w (W/m ²)	Operación anual (%)
10	2.36	1.89	2.66	11.06	31
15	2.56	2.07	2.89	12.90	35
20	2.71	2.20	3.06	14.48	38
25	2.83	2.31	3.20	15.89	40
30	2.94	2.40	3.32	17.18	41
35	3.03	2.48	3.42	18.37	43
40	3.11	2.56	3.51	19.50	44
45	3.19	2.62	3.59	20.56	45
50	3.26	2.68	3.66	21.57	46
55	3.32	2.74	3.73	22.53	46
60	3.38	2.79	3.79	23.46	47
65	3.43	2.84	3.85	24.36	48
70	3.48	2.89	3.91	25.22	48
75	3.53	2.93	3.96	26.06	49
80	3.58	2.97	4.01	26.88	50

DISCUSIÓN

Para la caracterización de los recursos ya sean eólico o solar es muy importante estudiar las tendencias horarias y mensuales, describir las horas a que ocurren las velocidades máximas y mínimas (Nuñez & Rodríguez, R., Pierra, A., Reyes, 2014) para precisar y escoger la tecnología a instalar. En esta investigación se determinó que la velocidad no es muy abundante como presumían los pobladores y es muy variable tanto en dirección y magnitud.

Por otro lado, el método de extrapolación es muy eficaz para determinar velocidades del viento a alturas mayores a 10 metros sobre el suelo (Mirhosseini, Sharifi, & Sedaghat, 2011). Para comparar los resultados de la estación meteorológica de SENAMHI que son velocidades registradas a 10 metros de suelo, se tiene que extrapolar (Elamouri & Ben Amar,

2008) desde 10 a 25 metros, ya que las velocidades obtenidas de la NASA están a 25 metros del suelo. Es importante también mencionar que la ecuación (1) es utilizada por la NASA (Ermolenko, Ermolenko, Fetisova, & Proskuryakova, 2017). Además, como se señalaba es importante también conocer la dirección predominante del viento para cuestiones de diseño de sistemas eólicos, la variabilidad en la dirección del viento permite que la turbina tendrá un movimiento de rotación permanente para posicionarse de frente al viento (I. G. Rivero, 2007), además ésta información permite calcular los gastos de operación y de mantenimiento del sistema a instalar.

Diversos estudios científicos relacionadas con las energías renovables (Guo et al., 2018; Kim, Oh, Kim, & Kim, 2018; Laiola & Giungato, 2017), proponen el uso de la función de densidad de probabilidad de Weibull para describir las distribuciones de

frecuencia de la velocidad del viento (Seguro & Lambert, 2000) the proposed modified maximum likelihood method, and the commonly used graphical method. The application of each method is demonstrated using a sample wind speed data set, and a comparison of the accuracy of each method is also performed. The maximum likelihood method is recommended for use with time series wind data, and the modified maximum likelihood method is recommended for use with wind data in frequency distribution format. (C. Para estimar los parámetros de Weibull existen diversos métodos como el método gráfico, de máxima verosimilitud y la de densidad de potencia (Islam et al., 2011). El método de densidad de potencia es la más idónea de estos métodos que se juzga en función de diferentes pruebas de bondad de ajuste para diferentes ubicaciones geográficas y tiene una formulación simple (Akdağ & Dinler, 2009).

La densidad de potencia media obtenida por el método de la distribución de Weibull, es importante en este estudio, que permite estimar la variación tanto de la velocidad del viento, así como de la potencia que varía con la altura (Elamouri & Ben Amar, 2008). El conocimiento de esos dos aspectos es necesario para instalar un aerogenerador. De acuerdo con las necesidades de la carga a la cual se desea suministrar electricidad, será necesario disponer aerogeneradores de mayor o menor potencia nominal o bien situar este a una altura ya determinada (Chen et al., 2013). En la actualidad podemos tener torres de entre 20 y 80 metros de altura, incluso de más altura. Para aerogeneradores de potencias, la altura de las torres varía entre 20 a 40 metros, mientras que para aerogeneradores de gran potencia las alturas son por sobre los 50 m (Ucar & Balo, 2009a). Si se propone construir un parque eólico, es conveniente que las turbinas eólicas del parque estén a diferentes alturas, la producción de la potencia eléctrica del parque eólico con turbinas eólicas a diferentes alturas se incrementa (Chen, Li, Jin, & Song, 2013), sin embargo, esto depende de la geografía del lugar a instalar.

Para proporcionar un información de mayor precisión, algunos autores (Mohammadi, Kasra., Omid, Alavi ., Ali, Mostafaiepour., Navid, Goudarzi ., Mahdi, 2016) sugieren que las evaluaciones se deben realizar en escalas diarias y mensuales, la precisión de los valores calculados de densidad de energía eólica cambiaran cuando se utilizan diferentes métodos de estimación de parámetros k y c . Otros autores como (Kim et al., 2018) y (Kollu, Rayapudi, Narasimham, & Pakkurthi, 2012) proponen otras alternativa similares o derivadas de la funciones de probabilidad Weibull. Estas mejoras o variaciones tienen aún poca trascendencia ya que al diseñar un parque eólico se trabaja con márgenes considerables o sistemas de seguridad asistido por computador para un cierto intervalo de operación de la turbina.

CONCLUSIONES

El recurso eólico disponible en la ciudad de Juliaca es aleatorio y muy variable en dirección y en magnitud. Existe mayor presencia de vientos en los meses de primavera y verano y el recurso es escaso en los meses de otoño e invierno. La velocidad promedio mensual del viento está entre 2 y 3 m/s para una altura de 10 m del suelo, la máxima velocidad del viento alcanzado es de 6.56 m/s. Así mismo se aprecia mayor variabilidad del recurso eólico en los meses de mayor recurso eólico alcanzando y varía en hasta 5 m/s y, la dirección predominante de la velocidad del viento es el oeste; sin embargo, un porcentaje considerable tiene la dirección este.

Al comparar los valores de la velocidad media obtenida con los datos de la NASA con los del SENAMHI, cabe precisar que la base de datos de la NASA es confiable en gran medida para caracterizar el recurso eólico, pues en particular para una altura de 25 m, la velocidad media anual fue 2.83 m/s y con los datos registrados por la NASA fue de 3.09 m/s con una variación global de 8.93%.

La función de densidad de probabilidad de Weibull permitió estimar la densidad media de potencia anual,

en particular para una altura de 25 m la densidad de potencia es igual a 15.91 W/m². Durante los meses de octubre y diciembre la densidad de potencia eólica es mayor; mientras que en los meses de mayo y junio la densidad de potencia fue menor. La densidad media de potencia varía en 143% cuando la altura varía de 10 a 80 m, estimándose para 80 m una densidad de potencia de 26.88 W/m², y la potencia media se duplica a los 50 m de altura en comparación con el valor a los 25 m del suelo.

En el caso de un aerogenerador con velocidad de arranque mayor o igual a 3 m/s e instalado a una altura de 25 m, el porcentaje de operación es de 40 %. En definitiva, el potencial explotable en la ciudad de Juliaca es adecuada para sistemas eólicos de baja potencia y de preferencia de eje vertical.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761–1766. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.020>
- Carta, J. A., González, J., & Subiela, V. (2009). Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands. *Solar Energy*, 75(2), 153–168. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00247-0)
- Carta, J. A., Ramírez, P., & Velázquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 933–955. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.005>
- Celik, A. N. (2003). Energy output estimation for small-scale wind power generators using Weibull-representative wind data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(5), 693–707. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00471-3](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00471-3)
- Celik, A. N. (2004). A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. *Renewable Energy*, 29(4), 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.07.002>
- Chang, T. P. (2011). Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*, 88(1), 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.018>
- Chen, Y., Li, H., Jin, K., & Song, Q. (2013). Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 70, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.007>
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294–303. <https://doi.org/10.1038/nature11475>
- De Borotoli, M. E. Canavasio, O. Benitez, F. M. (2002). Cuantificación de la dispersión al analizar velocidades de viento atmosféricos medias horarias mediante el análisis probabilístico de registros cortos. *ASADES: Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6(1), 17–23.
- Elamouri, M., & Ben Amar, F. (2008). Wind energy potential in Tunisia. *Renewable Energy*, 33(4), 758–768. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.005>
- Ermolenko, B. V., Ermolenko, G. V., Fetisova, Y. A., & Proskuryakova, L. N. (2017). Wind and solar PV technical potentials: Measurement methodology and assessments for Russia. *Energy*, 137, 1001–1012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.050>
- Guo, Q., Xu, X., Zhang, K., Li, Z., Huang, W., Mansaray, L. R., Huang, J. (2018). Assessing Global OceanWind Energy Resources Using Multiple Satellite Data. Remote sensing. doi: <https://doi.org/10.3390/rs10010100>
- Hualpa, M. (2006). *Estudio de Factibilidad de Sistemas Híbridos Eólico-Solar en el Departamento de Moquegua*.

- I. G. Rivero. (2007). *Metodología para evaluar la factibilidad de una planta de generación híbrida con energías renovables*.
- Islam, M. R., Saidur, R., & Rahim, N. A. (2011). Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. *Energy*, 36(2), 985–992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.011>
- Kollu, R., Rayapudi, S., Narasimham, S., & Pakkurthi, K. (2012). Mixture probability distribution functions to model wind speed distributions. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3(1), 27. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-3-27>
- Kim, J.-Y., Oh, K.-Y., Kim, M.-S., & Kim, K.-Y. (2018). Evaluation and characterization of offshore wind resources with long-term met mast data corrected by wind lidar. *Renewable Energy*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.097>
- Laiola, E., & Giungato, P. (2017). Wind characterization in Taranto city as a basis for innovative sustainable urban development. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.111
- Lorenzo, I. F., Tecnológica, U., Habana, D. La, Antonio, J., Habana, L., Beatriz, V., & Parnás, E. (2016). Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas, *VII(2)*, 15–25.
- Li, Z. (2018). Study of site suitability assessment of regional wind resources development based on multi-criteria decision. Springer Nature. doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1538-y>
- Mirhosseini, M., Sharifi, F., & Sedaghat, A. (2011). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 449–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.029>
- Mohammadi, Kasra., Omid, Alavi ., Ali, Mostafaeipour., Navid, Goudarzi ., Mahdi, J. (2016). Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density. *Energy Conversion and Management*, 108, 322–335. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.015>
- Nuñez, E., & Rodríguez, R., Pierra, A., Reyes, O. (2014). Revista Cubana de ciencias informáticas RCCI, Cuban journal of computer science. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 8(3), 106–120. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992014000300008
- Peralta-Jaramillo, J. (2015). *Modelamiento Computacional del Recurso Solar y Eólico para aplicación de Sistemas de Energía Renovable*. Retrieved from http://dspace.usc.es/bitstream/10347/12301/1/rep_791.pdf%5Cn
- Seguro, J. V., & Lambert, T. W. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75–84. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00122-1)
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraj, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Ucar, A., & Balo, F. (2009a). Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy*, 86(10), 1864–1872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.016>
- Ucar, A., & Balo, F. (2009b). Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludağ-Bursa, Turkey. *Applied Energy*, 86(3), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.05.001>
- Weisser, D. (2003). A wind energy analysis of Grenada: An estimation using the “Weibull” density function. *Renewable Energy*, 28(11), 1803–1812. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00016-8)

