

# Análisis del recurso energético eólico para la ciudad de Bogotá DC para los meses de diciembre y enero, Colombia

## Analysis of the wind energy resource for the Bogota city, Colombia

Mónica Patricia Burgos Gutiérrez<sup>1</sup>, Sergio Aldana Ávila<sup>2</sup>, Diego Julián Rodríguez Patarroyo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Estudiante Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, [monica.burgos.gutierrez@gmail.com](mailto:monica.burgos.gutierrez@gmail.com)

<sup>2</sup> Estudiante Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, [sergio.aldana.avila@gmail.com](mailto:sergio.aldana.avila@gmail.com)

<sup>3</sup> Ph.D.(c), Ingeniería, M.Sc. Física, Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, [djrodriguezxp@gmail.com](mailto:djrodriguezxp@gmail.com)

Fecha de recepción: 25/08/2015 Fecha de aceptación del artículo: 17/11/2015

### Resumen

En este artículo se hace un análisis estadístico de los datos de viento obtenidos en la estación meteorológica de la Fundación Universitaria Los Libertadores ubicada 4°39'05.98" N 74°03'59.08" O, zona urbana de Bogotá DC, Colombia.

Los datos recolectados son ajustados mediante la función de probabilidad de Weibull de la que se obtienen dos parámetros: el factor de forma y el factor de escala; el primero indica la asimetría de la función y el segundo determina un valor próximo a la velocidad media, con este segundo valor se puede establecer el potencial energético del viento, el cual es función de la velocidad media del viento, la densidad del aire a las condiciones atmosféricas del lugar y un factor de energía del viento también conocido como el factor de potencia eólica.

### Palabras clave

Dirección de viento, distribución de Weibull, recurso eólico, rosa de vientos, velocidad de viento.

### Abstract

This paper has a statistical analysis of wind data obtained at the meteorological station of the Fundación Universitaria Los Libertadores located Cra. 16 #63a-58, urban area of Bogotá, Colombia. The collected data are adjusted using the probability function of Weibull which results in two parameters: the form factor and the scale factor; the first indicates the asymmetry of the

function and the second determines a value close to the average speed, the energy potential of the wind, which is a function of the average speed of the wind, the density of air at atmospheric conditions of the place and a factor of wind energy also known as wind power factor can be set with this second value, available on-site wind power density is 3, 49W/m<sup>2</sup>.

### Keywords

Weibull distribution, wind direction, wind resource, wind rose, wind speed.

### 1. Introducción

América Latina es una de las regiones con mayor diversidad biológica, se estima que posee entre el 31% y el 50% de los recursos del planeta [1], Colombia cuyo territorio es rodeado por dos océanos cuenta con grandes recursos: agricultura, ganadería, grandes riquezas en minerales y petróleo.

La matriz energética del país está constituida en un 63% por energía hidráulica, seguida por gas en un 18% [2] y menos de un 5% en energías no convencionales. En Colombia se han implementado diversos mecanismos para incentivar la participación de dichas energías en la generación, créditos con bajos intereses, subsidios económicos a quienes las implementen, entre otros [3]. Sin embargo, la masificación de dichas tecnologías toma tiempo en afianzarse.

La ley 1715 de 2014 tiene como objetivo "Incentivar la penetración de las fuentes no convencionales de

energía, principalmente aquellas de carácter renovable en el sistema energético colombiano, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda en todos los sectores y actividades, con criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económica”[4] por lo tanto es importante medir y evaluar los recursos energéticos disponibles en el territorio Colombiano.

En el presente artículo se realiza la evaluación del recurso eólico en la zona urbana de Bogotá, determinando el potencial energético del lugar y si es viable técnicamente el emplazamiento de un aerogenerador.

## 2. Metodología

Para determinar el recurso eólico en un lugar es necesario realizar las siguientes mediciones: presión atmosférica, temperatura del lugar, altura sobre el nivel del mar y por supuesto velocidad del viento, entre otros.

Mediante el procesamiento de dichos datos, se puede obtener la velocidad media que indicará si en ésta área es viable la ubicación de un aerogenerador, además dependiendo de los parámetros arrojados por la distribución de Weibull y la rosa de los vientos es posible determinar qué tipo de aerogenerador es el adecuado.

Inicialmente, se realiza un histograma para determinar entre qué velocidades en m/s se encuentra la mayor parte de los datos, para la elaboración de este histograma se debe tener en cuenta el número óptimo de clases, que ésta dado por la regla de Sturges, [5] descrita a continuación:

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

dónde N, es el número de datos de la muestra.

### 2.1 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es una distribución de densidad de probabilidad, la cual permite conocer las características de la velocidad del viento: en las abscisas se encuentra las velocidades de viento y en las ordenadas el número de veces que dicha velocidad se repite. Esta gráfica es de gran importancia ya que muestra que las

velocidades de viento elevadas son eventos poco frecuentes y velocidades de viento regulares son eventos que se repiten con mayor frecuencia, es por esto que la distribución de Weibull presenta una asimetría, [6],[7].

Para la construcción de ésta se toma como punto de partida el histograma construido y luego se hallan los parámetros k y c, dónde:

- $k$ : factor de forma, que caracteriza la asimetría o sesgo de la función.
- $c$ : factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media.
- $v$ : velocidad del viento (m/s)

Relacionados entre sí de la siguiente manera:

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

En la Figura 1, se muestra un conjunto de graficas de Weibull para distintos valores del parámetro k, en donde se puede observar la influencia de este parámetro en la forma de la curva; en el eje x, la velocidad del viento en m/s y en el eje y, la función de probabilidad.

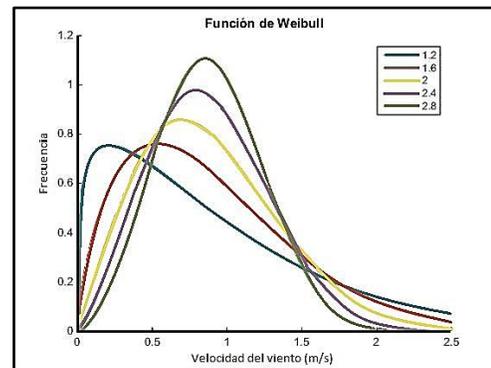


Figura 1. Densidad de probabilidad de la velocidad de viento según la ley de Weibull para distintos valores de k.

Para determinar los parámetros de Weibull se debe tener en cuenta los datos disponibles, generalmente se conocen las velocidades medias diez minútales, semi-horarias, u horarias [6].

El método de los mínimos cuadrados que permite calcular los parámetros de la función Weibull, se realiza de la siguiente manera:

Se definen las clases del histograma ( $v_i$ ), la frecuencia relativa ( $f_i$ ) y la frecuencia relativa acumulada ( $F_i$ ). Posteriormente, se halla  $y_i$  y  $x_i$  de la siguiente manera [8]:

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

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

Entonces, se hallan los valores de A y B

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

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

Dado que se requieren hallar los parámetros k y c, no los valores de A y B, los cuáles están dados por las siguientes expresiones:

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

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

## 2.2 Densidad del aire

La densidad del aire es un factor importante a la hora de determinar el potencial eólico de un lugar, para un aire frío la densidad de potencia es superior a uno más caliente, de la misma forma, un lugar situado a nivel del mar tiene una densidad de potencia mayor a un lugar de mayor altitud, dado que la densidad del aire disminuye con la altura.

Para determinar la densidad del aire pueden utilizarse métodos directos o indirectos. Para la obtención indirecta de la densidad, se miden la masa y el volumen por separado y posteriormente se calcula la densidad. Adicionalmente, puede determinarse de forma indirecta conociendo los parámetros como temperatura, altura sobre el nivel del mar [2]:

$$\rho = 1,225 \left( \frac{288}{T + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (9)$$

En donde  $\rho$  es la densidad del aire, h la altura en m.s.n.m. y T la temperatura promedio del lugar, en centígrados.

## 2.3 Potencial energético disponible

La potencia eólica disponible es la máxima potencia que puede obtenerse si se extrae toda su energía cinética, es proporcional a la densidad del aire, al área expuesta y al cubo de la velocidad del viento.

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

Generalmente, se expresa en densidad de potencia disponible por unidad de área, de la siguiente manera:

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

dónde:  $P_d$ , es el potencial eólico ( $\text{w/m}^2$ ), A área ( $\text{m}^2$ ),  $\rho$  densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  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:

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

es importante aclarar que el término del numerador se halla elevando primero las velocidades instantáneas al cubo y posteriormente hallando el promedio de este valor, mientras que el denominador es el promedio de las velocidades elevado al cubo.

## 2.4 Rosa de los vientos

Una de las representaciones más comunes de la dirección del viento es la rosa de los vientos que consiste en un diagrama polar en el cual se definen diferentes direcciones de viento. Existen diferentes formas de construir la rosa de vientos [6]:

- Porcentaje del tiempo total que el viento sopla en una determinada dirección
- Representación para cada dirección en la que el tiempo se mantiene en determinado intervalo.
- Velocidad media de viento para cada dirección.

La rosa de los vientos permite determinar las direcciones dominantes de los vientos, generalmente ésta dirección no coincide con la mayor intensidad del viento, este es un aspecto importante a tener en cuenta para la correcta colocación de los aerogeneradores.

### 3. Resultados

Para las gráficas de comportamiento del viento se utilizaron los datos obtenidos de la estación meteorológica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, la cual está configurada para tomar muestras cada 10 minutos; se utilizó el programa MATLAB obteniendo los siguientes resultados para los meses de diciembre y enero.

#### 3.1 Velocidad del viento

Para el mes de diciembre del año 2014 se tiene un total de 522 datos, con un tiempo de muestreo de 10 minutos entre mediciones, según la regla de Sturges el número de clases óptimo será:

$$No. Clases = 1 + 3.32 \log(522) = 10 \quad (13)$$

Por otra parte, se realiza la estimación de la media del viento y la desviación típica de la muestra, obteniendo respectivamente:

$$\hat{\nu} = 1,7183 m/s \quad (14)$$

$$\sigma = 0,9172 m/s \quad (15)$$

En la

Figura 2 se observa el histograma de los datos tomados por la estación meteorológica y el ajuste de Weibull para dicho periodo de tiempo, en el eje X, la velocidad del viento en m/s y en el eje Y el número de repeticiones del evento.

De los datos obtenidos de velocidad media y desviación típica puede deducirse que la mayor parte de los datos se encuentran entre 0,80m/s y 2,63m/s.

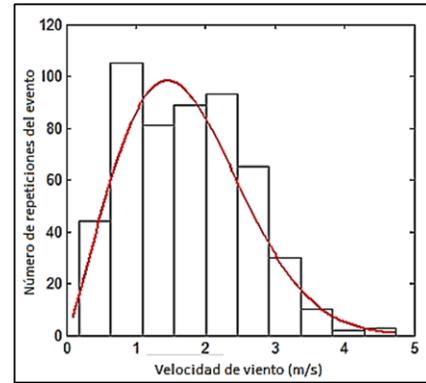


Figura 2. Distribución de Weibull para diciembre 2014.

A continuación, se calcularon los parámetros de forma y escala de la distribución:

$$k = 2,13 \quad (16)$$

$$c = 1,95 \frac{m}{s} \quad (17)$$

Se puede observar que el valor del factor de forma k, es un valor grande que indica que la gráfica de la distribución de Weibull no es tan asimétrica; adicionalmente, el factor de escala  $\zeta$ , muestra una velocidad cercana a la velocidad media de los datos.

Posteriormente, se realizaron las mediciones para el mes de enero. En total se tomaron 3684 datos cada 10 minutos entre enero 1 y enero 28, para la construcción del histograma se calcula el número de clases que se debe tener:

$$No. Clases = 1 + 3.32 \log(3684) = 13 \quad (18)$$

Adicionalmente, se calcula la velocidad media del viento de la muestra y la desviación típica de los datos:

$$\hat{\nu} = 1,7169 m/s \quad (19)$$

$$\sigma = 0,9252 m/s \quad (20)$$

Lo cual permite estimar que la mayor cantidad de los vientos medidos en el mes de enero de 2015 se encuentran entre 0,79m/s y 2,64m/s. En la figura 3 se observa el histograma de los datos y la distribución de probabilidad de Weibull.

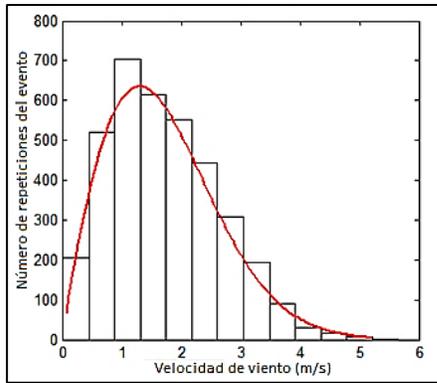


Figura 3. Distribución de Weibull. Enero de 2015

Al realizar los cálculos para los factores de forma y de escala respectivamente se obtiene que:

$$k = 1,89 \quad (21)$$

$$c = 1,92 \text{ m/s} \quad (22)$$

Respecto al parámetro  $k$  se observa que la Figura 3 Distribución de Weibull para el mes de enero presenta una mayor asimetría y por lo tanto su valor de  $k$  es inferior que para el mes de diciembre, mostrado en la Figura 2, el valor del factor de escala ( $c$ ) es cercano a la velocidad media de la muestra.

Posteriormente, se repitió el mismo procedimiento, para el total de los datos tomados por la estación es decir 4206 datos, determinando el número de clases:

$$No. \text{ Clases} = 1 + 3.32 \log(3684) = 14 \quad (23)$$

La velocidad media del viento y la desviación estándar total de la muestra es de:

$$\hat{v} = 1,7183 \text{ m/s} \quad (24)$$

$$\sigma = 0,9172 \text{ m/s} \quad (25)$$

Indicando que para los meses de diciembre y enero la mayor parte de los vientos van a estar entre 0,80m/s y 2,63m/s; esto es importante conocerlo debido a que los aerogeneradores tienen una velocidad de arranque y una velocidad de potencia máxima que deben tenerse en cuenta para elegir el adecuado.

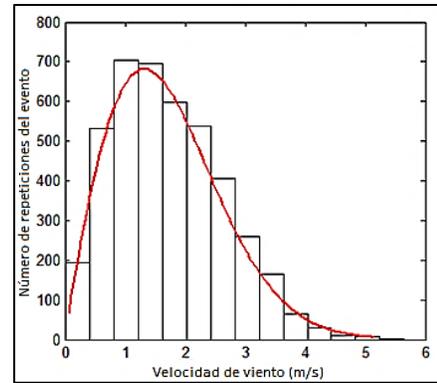


Figura 4. Distribución de Weibull Dic-Ene.

Obteniendo los parámetros para ambos meses:

$$k = 1,92 \quad (26)$$

$$c = 1,93 \text{ m/s} \quad (27)$$

### 3.2 Densidad de viento

Los datos suministrados por la estación meteorológica incluyen temperatura medida cada 10 minutos y presión barométrica, al hallar el promedio de cada uno se obtiene:

$$T_{\text{Promedio}} = 14,98 \text{ }^\circ\text{C} \quad (28)$$

$$P_{\text{promedio}} = 748,79 \text{ mBar} \quad (29)$$

De la presión barométrica promedio es posible conocer la altura a la cual se tomaron los datos en metros sobre el nivel del mar [9]:

$$h = 2644 \text{ m. s. n. m} \quad (30)$$

Para calcular la densidad del aire se tiene en cuenta la ecuación 9, que relaciona la densidad del aire con la altura del lugar y la temperatura en grados Celsius:

$$\rho = 1,225 \left( \frac{288}{14,98 + 273} \right) e^{-\left(\frac{2644}{8435}\right)} \quad (31)$$

$$\rho = 0,895 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (32)$$

### 3.3 Potencial energético del viento

El factor de energía es el cociente entre elevar todos los datos de velocidad al cubo y posteriormente hallar el promedio de estos, y hallar el promedio de los datos de velocidad para luego elevarlos al cubo, de la siguiente manera:

$$F_e = \frac{9,823}{5,073} = 1,936 \quad (33)$$

Entonces para calcular la densidad de potencia eólica:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2}(0,895)(1,936)1,7183^3 \quad (34)$$

$$\frac{P_d}{A} = 4,33W/m^2 \quad (35)$$

Existen ciertos criterios a la hora de seleccionar emplazamientos de una turbina eólica [6], entre las condiciones se encuentran:

- Elevada velocidad media.
- Buena exposición al viento y ausencia de obstáculos.
- Vientos fuertes y condiciones de turbulencia aceptables.
- Baja probabilidad de alcanzar vientos muy intensos.

Para los datos tomados en la estación meteorológica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, ubicada en zona urbana de Bogotá, se obtuvo una velocidad media de 1,71 m/s y una densidad de potencia eólica de 4,33W/m<sup>2</sup>.

### 3.4 Dirección de viento

Para la construcción de la rosa de vientos para los meses de diciembre y enero, se crearon clases cada 18° para un total de 20 clases diferentes, posteriormente se contaron el número de eventos presentes en cada clase, como se observa en la

Figura 5 existe una dirección dominante alrededor entre 108° y 126°, con cerca de 450 repeticiones.

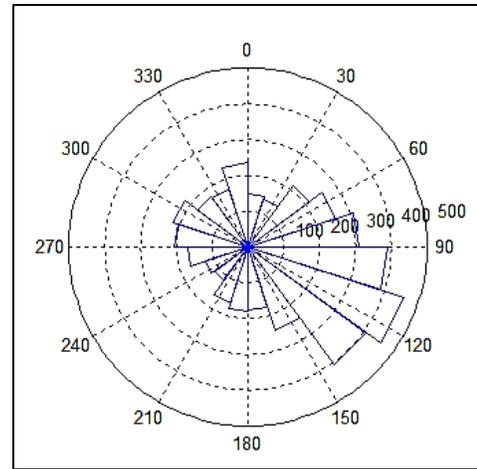


Figura 5. Rosa de los vientos Dic-Ene.

## Conclusiones

- En la zona urbana de Bogotá no se considera viable técnicamente la ubicación de un aerogenerador, porque las características del viento, la densidad del aire y la altura son factores no-favorables para obtener una densidad de potencia eólica alta.
- Seleccionando un aerogenerador que requiera la menor velocidad de arranque en el mercado, se encontró el Aeolos-V de 300W, teniendo en cuenta que la densidad de potencia eólica es de 4,33W/m<sup>2</sup> y el radio del rotor es de 0,6m, implicaría que se obtendría una potencia de 4,89W, muy por debajo de la potencia nominal del aerogenerador.
- La velocidad media del viento en zona urbana de Bogotá para los meses diciembre y enero es de 1,72m/s, una velocidad que resulta insuficiente para desarrollar proyectos de energía eólica, debido a que el aerogenerador que más se asemeja a la características del viento, éste posee una velocidad de arranque de 1,5m/s y una velocidad de potencia máxima que se encuentra cercana a los 10m/s; es decir, que el aerogenerador tendría suficiente viento para arrancar pero nunca alcanzara la velocidad de 10m/s, lo que implica que estaría operando muy por debajo de sus valores de diseño.

## Referencias

1. Cepal, S. D. E. L. a. (2014). El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe.
2. Upme. (2013). Plan De Expansion De Referencia Generacion - Transmisión, 1– 475.
3. Zuluaga, M. M., & Dyner, I. (2007). Incentives for renewable energy in reformed Latin-American electricity markets: the Colombian case. *Journal of Cleaner Production*, 15(2), 153–162.
4. Colombia, C. De. (2014). Ley N° 1715 Del 13 De Mayo De 2014, (May), 26.
5. Universidad Nacional de Colombia. (2002). *Probabilidad y estadística*, Consultado Octubre 21, 2015, En: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/html/un1/cont\\_115\\_15.html](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/html/un1/cont_115_15.html)
6. Villarrubia L. M. (2013). *Ingeniería de la energía eólica*. (1st ed.). México: Alfa Omega Grupo Editor S.A.
7. Universidad del País vasco. (2015). Recurso Eólico. Consultado Octubre 21, En: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/viento/datos/estadistica.html>.
8. Bhattacharya, P., Bhattacharjee, R. (2010). A Study on Weibull Distribution for Estimating the Parameters. *Wind Engineering*, 33(5), 469–476.
9. Equivalencia de presión atmosférica según la altitud. (2012), (2). <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>