

Estudio de Comportamiento de Velocidad del Viento en Boca del Río Mediante Distribución Weibull



Colaboración

Erika Jazmín De la Cruz Ángel; José Alfredo Inclán Barragán; Guadalupe González Mejía; Ruth María Grajeda Rosado, Universidad Veracruzana; Pedro Díaz Abascal, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

RESUMEN: Para conocer una proyección estadística de la energía eólica disponible en la zona urbanizada de Boca del Río, Veracruz es necesario realizar un estudio de la distribución de velocidad de viento. Este estudio describe el comportamiento de la velocidad del viento utilizando el modelo de probabilidad de Weibull y sus parámetros de forma y escala. La muestra de los datos de velocidad de viento proviene del Observatorio Meteorológico, estación 76692, Centro Regional Hidrometeorológico de CONAGUA en Boca del Río. De acuerdo con el estudio efectuado para el periodo del año 2021 a 2023, la velocidad promedio anual del viento fue de 2.18, 2.27 y 2.22 m/s para cada año respectivamente, se ubica en escala 2 de Beaufort. La curva de distribución Weibull muestra una función de densidad de probabilidad con poca variabilidad para cada periodo y con tendencia a bajas velocidades. Los resultados obtenidos representan una fuente de información útil capaz de generar un perfil de velocidades a distintas alturas y la posibilidad de obtener densidad de energía eólica con los datos experimentales en una zona urbana.

PALABRAS CLAVE

Distribución de Weibull, velocidad de viento, factor de escala y forma, energía eólica, zona urbana.

ABSTRACT: Performing a study on the wind speed distribution is necessary to understand a statistical projection of available wind energy in the urbanized area of Boca del Río, Veracruz. This study describes the behavior of wind speed using the Weibull probability model and its shape and scale parameters. The wind speed data sample comes from the Meteorological Observatory, station 76692, at the CONAGUA Regional Hydrometeorological Center in Boca del Río. According to the study conducted for the period from 2021 to 2023, the average annual wind speed was 2.18, 2.27, and 2.22 m/s for each respective year, placing it at Beaufort scale two. The Weibull distribution curve shows a probability density function with little variability for each period and a tendency towards low speeds. The results obtained represent a useful source of information capable of generating velocity profiles at different heights and the possibility of obtaining wind energy density with experimental data in an urban area.

KEYWORDS

Weibull distribution, wind speed, scale and shape parameter, eolic energy, urban area.

INTRODUCCIÓN

A nivel global, los países líderes en producción de energía eólica son China (45 GW), Estados Unidos (43 GW) y Alemania (28 GW), con un total de 80 granjas, 103 parques y 21,607 turbinas eólicas respectivamente [1], este es un ejemplo del porque se ha impulsado a nivel mundial el uso de las energías renovables [2, 3]. A pesar del potencial eólico destacado en diversas regiones de México como el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, la costa del Pacífico y áreas en Baja California Sur, Coahuila, Hidalgo, Quintana Roo y Zacatecas, la capacidad instalada desde los últimos 6 años a la actualidad alcanzo aproximadamente 1.35 GW adicionales a los 6 GW instalados, representando solo el 2% de la producción total. Sin embargo, expertos señalan que este potencial podría aumentar hasta un 14% [4].

Las regiones con recurso potencial eólico deben ser caracterizadas a través de técnicas de estadística descriptiva. Este es-

tudio describe un análisis del comportamiento de la velocidad del viento en la zona urbana de Boca del Río Veracruz durante un periodo de los últimos tres años (del periodo 2021 al 2023), utilizando datos medidos en un centro meteorológico local. Este análisis es decisivo para comprender la variabilidad de velocidades del viento en un periodo de tiempo, la posibilidad de identificar un perfil de velocidades a distintas alturas para la generación de energía eólica y efectos en la planificación urbana, aspectos clave para el desarrollo sostenible de una ciudad.

Es relevante mencionar que el estudio se lleva a cabo en una ciudad costera, donde las condiciones climáticas extremas como tormentas han limitado previamente la exploración de fuentes limpias de energía. No obstante, se han desarrollado tecnologías innovadoras como árboles eólicos y turbinas verticales más compactas que se adaptan a estos entornos urbanos [5].

La caracterización del recurso renovable se lleva a cabo a través de medidas de tendencia central y de dispersión, con los modelos de probabilidad para generar conocimiento del comportamiento del viento en la zona estudiada. La recopilación de datos está basada en la dirección, el valor de velocidad máxima, mínima y promedio del viento, densidad de potencia en un punto específico dentro de la ciudad. El análisis estadístico con el modelo de función de Weibull permite evaluar el potencial energético eólico de las zonas estudiadas y las variaciones a lo largo del tiempo.

Tras evaluar la distribución de probabilidad de velocidad del viento en el lugar de estudio, se puede determinar el potencial eólico disponible en la zona urbanizada y conocer datos necesarios para extrapolar la altura en casos donde no se dispone de información en una localización precisa.

Ante la posibilidad de crecer cuatro veces más la capacidad actual instalada a nivel nacional, propicia el interés de abordar un caso de estudio que beneficie la línea de energía renovable con miras a viabilizar propuestas relacionadas con la energía eólica cercana a la zona costera y realizar investigaciones adicionales para valorar su factibilidad técnica y económica. Un ejemplo similar fue un estudio realizado en 2012, se examinó 16 estaciones anemométricas en todo el estado de Veracruz, México a una altura de 50m, revelando un promedio de velocidad del viento de 5.45 m/s. Se estimó que utilizando un aerogenerador ACCIONA AW 70/1500 Clase I, se podría generar entre 10,694 y 14,432 MWh/año, lo que resultaría en una reducción de aproximadamente 28,806 toneladas de CO₂ en emisiones de gases de efecto invernadero [6].

METODOLOGÍA

Las variaciones de velocidad del viento dependen principalmente de las condiciones climatológicas o la diferencia de temperatura entre el día y la noche debido a los efectos de convección, la temporada estacional y la capa límite terrestre que se deriva de condiciones de superficie local u obstáculos. Para conocer el aprovechamiento del potencial eólico en una zona es necesario evaluar el recurso mediante la aplicación de métodos estadísticos.

La ecuación estadística empleada en el análisis de los datos de medición registrados es la distribución probabilística de Weibull, la cual es ampliamente utilizada para examinar y monitorear datos de velocidad del viento en una ubicación específica durante el periodo determinado en el estudio. Esta función tiene dos variaciones dependiendo del número de parámetros utilizados, para datos del viento se utilizan dos parámetros que se pueden evaluar por distintos métodos para proporcionar un ajuste preciso a la distribución de probabilidades, siendo la técnica empírica o método de los momentos considerada por varios autores como el más adecuado y recomendado para analizar datos en fuentes de energía renovable en comparación con otras distribuciones estadísticas [7, 8].

Los datos utilizados en el estudio son provenientes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente del Centro Regional Hidrometeorológico de Boca del Río en la estación 76692 del Observatorio Meteorológico, con coordenadas geográficas Latitud 19 grados 08' 34.76" N y longitud 96 grados 06' 40.73" W [9]. Esta institución proporcionó los valores registrados de manera horaria durante el periodo comprendido del año 2021 al 2023.

La muestra se obtuvo con los instrumentos de medición colocados a una altitud de 15 msnm, sobre un mástil de 10 metros de altura sobre la superficie como lo marca la normatividad para estaciones meteorológicas, hasta considerar una altura total de 25 msnm. Los datos se obtuvieron para calcular el comportamiento de perfil de viento, pudiéndose estimar que se obtendrá una mayor velocidad de vientos hacia una mayor altura dado que en la vertical los vientos van aumentando exponencialmente.

En la Figura 1 se muestra una fotografía del anemocinógrafo Modelo F-420C-M4 de la marca ESTERLINE ANGUS. Este instrumento está compuesto por una veleta y un anemómetro, del cual se obtuvieron los registros de mediciones de velocidad del viento en m/s y la dirección de este en los puntos cardinales de la rosa de los vientos.

ESTACIONALIDAD DEL VIENTO

Se realizó un estudio estadístico anual de la velocidad media diaria del viento obtenida a partir de las mediciones registradas cada año durante el periodo 2021 al 2023. En la ecuación 1 se muestra la fórmula utilizada para obtener la tendencia central o punto medio de una distribución conocida como velocidad media o promedio en cada periodo anual. Los datos son previamente ordenados por frecuencias y de acuerdo con el número de muestras se obtiene el promedio de las velocidades del viento con la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i * f_i}{n} \tag{Ec. (1)}$$

En la ecuación 2 se muestra la fórmula de la desviación típica o estándar para calcular la distancia promedio de cualquier observación con respecto a la media de distribución y se representa mediante la siguiente expresión:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{Ec. (2)}$$

Dada la variabilidad y asimetría de las velocidades de viento, la distribución de probabilidad se realiza a través del análisis de la función de distribución de Weibull. En la ecuación 3 se muestra la función que define la curva de la densidad de probabilidad y está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{Ec. (3)}$$

Los parámetros asociados en la distribución de Weibull se calculan con el método empírico. La ecuación 4 define el valor k que representa el factor de forma adimensional, la fórmula utiliza el valor de la desviación estándar para estimar la dispersión de un conjunto de datos alrededor de su valor medio y se expresa:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}}\right)^{-1.086} \tag{Ec. (4)}$$

De la ecuación 5 se obtiene el valor c que es el factor de escala dado en m/s. Una vez encontrado el valor k se puede utilizar en la fórmula que está en función de la velocidad media y la función gamma expresada por:

$$c = \frac{\bar{x}}{\gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \tag{Ec. (5)}$$

A partir de los parámetros se puede conocer la distribución ajustada a la información del recurso eólico y se puede graficar con el histograma de frecuencia.



Figura 1. Equipo de medición Modelo F-420C-M4 de la marca ESTERLINE ANGUS
Fuente: Observatorio Meteorológico 76692 Boca del Río, Ver.

CASO DE ESTUDIO

En la Figura 2 se muestra la ubicación del sitio donde se tomaron las mediciones y registros de las velocidades y direcciones del viento. De acuerdo con la climatología de la zona conurbada de Veracruz (comprendiendo los municipios de Veracruz, Boca del Río, Medellín de Bravo y Alvarado), el clima es predominantemente cálido y húmedo, con temperaturas superiores a 18°C, según la clasificación de Köppen es Aw [10]. La temperatura media anual es de 25.23°C, con lluvias concentradas en verano y una escasa variación térmica, lo que origina la canícula, un periodo de calor intenso. La región experimenta fenómenos como bruma, niebla, lluvias fuertes, tormentas eléctricas y ocasionalmente pequeños tornados debido al fenómeno de El Niño. Es importante mencionar que la presencia de un frente frío en el Golfo de México genera vientos del norte al sur, conocidos como “Norte”, que pueden alcanzar velocidades de hasta 30 m/s [11].



Figura 2. Ubicación del caso de estudio en Boca del Río, Veracruz.
Fuente: Creación propia

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones 1, 2, 4 y 5 que describen las variables estadísticas por periodo anual. A partir de estos parámetros utilizados en la ecuación 3, se generó la curva de distribución del comportamiento de la velocidad del viento definidas para cada año.

Tabla 1. Datos estadísticos del viento.

Año	Velocidad Promedio (m/s)	Desviación Estándar (m/s)	factor de forma k	factor de escala c (m/s)	Velocidad Máxima (m/s)
2021	2.18	1.64227	1.357176	2.37648	8.83
2022	2.27	1.79247	1.292747	2.45716	12.00
2023	2.22	1.85805	1.214387	2.37021	12.28

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

En relación con los datos obtenidos durante el periodo estudiado, se pudo observar que la velocidad promedio anual tiende a valores continuos sobre 2.2 m/s, alcanzando una velocidad máxima de 12 m/s en los últimos dos años.

La Figura 3 corresponde al histograma del año 2021, donde se observa la curva de distribución de velocidades, presentándose la menor velocidad promedio (2.18 m/s) del caso de estudio.

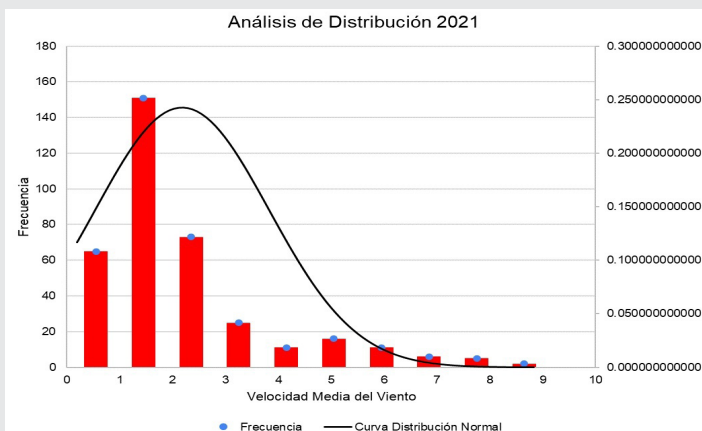


Figura 3. Curva de Distribución de Frecuencias de velocidades en el año 2021.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 corresponde al histograma del año 2022, donde se observa la curva de distribución de velocidades, presentándose la mayor velocidad promedio (2.27 m/s) del caso de estudio.

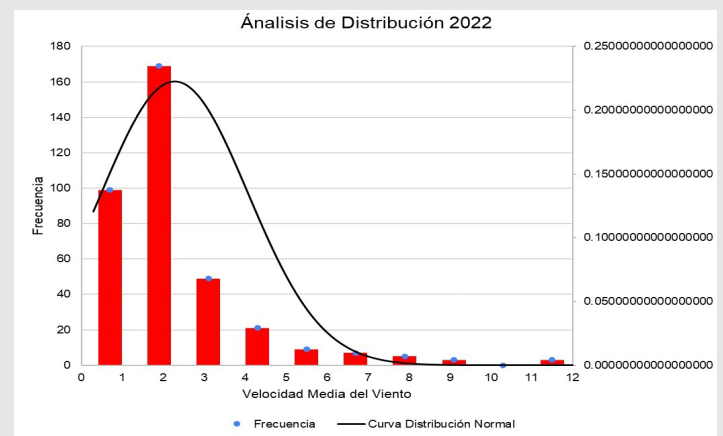


Figura 4. Curva de Distribución de Frecuencias de velocidades en el año 2022.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra el histograma del año 2023, donde la curva de distribución de velocidades muestra un valor intermedio (2.22 m/s) del periodo estudiado.

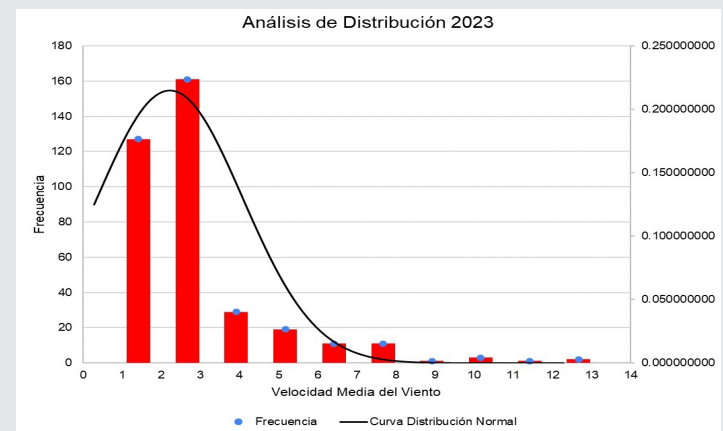


Figura 5. Curva de Distribución de Frecuencias de velocidades en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Las medidas de tendencia central se utilizaron en las curvas de distribución normal y al evaluarlas se aprecia como se van desplazando respecto a las frecuencias de velocidad media del viento, en el 2021 se muestra a la derecha de los histogramas, en el año 2022 se muestra con tendencia alineada a las frecuencias y para el año 2023 se muestra a la izquierda del histograma.

Se aprecia una distribución con apuntamiento y alta frecuencia de velocidades bajas con comportamiento similar, mientras que hacia la derecha del histograma se muestra una cola representativa de frecuencias bajas para velocidad de viento más altas.

En la Figura 6 se muestra la gráfica de los parámetros estadísticos de la función de distribución de

Weibull evaluada en cada año. El rango de variación de k es menor a 2 que muestra la regularidad del viento, mientras que el valor de c se presenta en 2.37 m/s, 2.45 m/s, y 2.37 m/s correspondiente a cada año.

Se puede observar que el comportamiento de la velocidad en cada año presenta un decremento en la probabilidad de frecuencia de los dos últimos años estudiados.

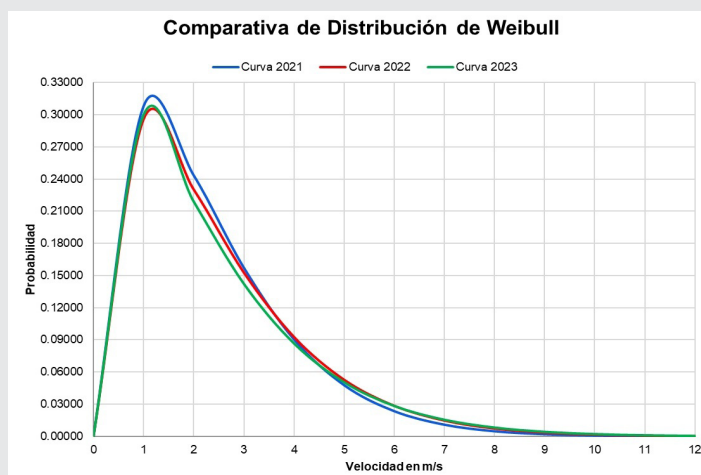


Figura 6. Curvas de Distribución de Weibull de los años 2021 al 2023.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La evaluación estadística del viento es importante para realizar un proyecto eólico en la zona urbanizada. El análisis de la velocidad promedio y la probabilidad de distribución es determinante para estimar la energía eólica disponible y las características de distribución del recurso en el lugar de estudio y su zona de influencia. Para determinar el aprovechamiento eólico se debe tomar en consideración la urbanización y los patrones estacionales del viento.

El comportamiento de velocidades promedio anual mostrados en la Tabla 1, presenta una velocidad media mínima de 2.18 m/s y máxima de 2.27 m/s, que están consideradas como brisa suave (1.6 – 3.3 m/s) según la escala de Beaufort, ubicado en escala 2, por encima de la ventolina y la calma, lo cual significa que hay movimiento de masas de aire en la zona de estudio de forma constante a una velocidad del viento media de 2.2 m/s del periodo 2021 a 2023, considerada relativamente baja.

En los histogramas de frecuencias obtenidos de las distribuciones de datos anuales, se observaron curvas de distribución normal diferentes en sus probabilidades, pero de velocidades semejantes.

Posteriormente se analizaron los datos mediante una función de probabilidad con parámetros calculados

por el método empírico. Las curvas de distribución de Weibull anuales muestran una tendencia similar en la función de densidad de probabilidad aplicadas a los datos observados, el rango de variación de k es menor a 2, lo que indica cierta regularidad del viento.

El comportamiento de los vientos durante el periodo de estudio presenta un decremento en la probabilidad de frecuencia en los dos últimos años.

El escenario calculado con las muestras de medición es insuficiente para definir si existe un potencial eólico, ya que se requiere realizar la proyección del comportamiento a diversas alturas mediante un estudio de perfil de velocidades e identificar las características del terreno para evaluar en un emplazamiento cercano y la posibilidad de obtención recursos eólicos importantes en la zona.

El comportamiento de vientos en la zona de estudio expone un panorama inicial del recurso eólico disponible, pudiendo continuar el estudio con mayor profundidad, para obtener una estimación eólica de la zona urbana.

A pesar de las velocidades obtenidas que se considera en escala menor, pueden ser aptas para aerogeneradores de baja potencia. Es pertinente estudiar la variación de la dirección del viento para identificar un diseño adecuado que permita un funcionamiento continuo a lo largo del año.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente al Centro Regional Hidrometeorológico de Boca del Río por el apoyo brindado y del cual sirvió la información empleada en el estudio del viento.

A los estudiantes Valeria Sosa Ortega y Nahara Nicole Ricardo Torres del Programa Educativo Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Región Veracruz, por su apoyo en el manejo de datos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaría de Gobernación, «La energía eólica en México. Una perspectiva social sobre el valor de la tierra,» Comisión, Ciudad de Mexico, 2015.

[2] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde y G. J., «Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1753-1766, 2011.

[3] M. Mirhosseini, F. Sharfi y A. Sedagha, «Assessing the wind energy potential locations in pro-

vince of Semnan in Iran,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 449-455, 2011.

[4] M. González-Ávila, L. Beltrán-Morales, E. Troyo-Diéguez y A. Ortega-Rubio, «Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México.,» *Interciencia*, vol. 31, n° 4, pp. 240-245, 2006.

[5] J. Ramos, «Tomorrow City ¿Tiene sentido las turbinas eólicas en las ciudades?,» *Fira Barcelona*, 27 September 2022. [En línea]. Available: <https://www.tomorrow.city/es/pueden-usarse-turbinas-energia-eolica-ciudad/>. [Último acceso: 2024].

[6] Q. Hernández-Escobedo, F. Espinosa-Arenal, R. Saldaña-Flores y C. Rivera-Blanco, «Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz,» *Dyna*, vol. 79, n° 171, pp. 215-221, 2012.

[7] S. Akdağ, H. Bagiorgas y G. Mihalakakou, «Use of two-component Weibull mixtures in the analysis of wind speed in the Eastern Mediterranean,» *Applied Energy*, vol. 87, n° 8, pp. 2566-2573, 2010.

[8] A. Rathore, A. Kumar, S. Patel, P. Khatakar y N. Patidar, «Modelling of Wind Speed Data using Weibull Distribution Function in Dewas,» *IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, pp. 1-5, 2022.

[9] Gobierno de Mexico, «Centro Hidrometeorológico Regional “Boca del Rio - Veracruz”,» *CONAGUA*, 2022. [En línea]. Available: <https://smn.conagua.gob.mx/es/centro-hidrometeorologico-veracruz-boca-del-rio>. [Último acceso: 2024].

[10] S. M., G. L. y G. M., «Los climas cálidos subhúmedo del Estado de Veracruz, México,» *Forresta Veracruzana*, vol. 3, n° 2, pp. 31-40, 2011.

[11] Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología, «<https://digaohm.semarmar.gob.mx/>,» *Secretaría Marina*, 2024. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbnmn-nibpcjpcglclefindmkaj/https://digaohm.semarmar.gob.mx/cuestionarios/cnarioVeracruz.pdf>. [Último acceso: 2024].

