



PROSPECTIVA

ISSN: 1692-8261

rprospectiva@gmail.com

Universidad Autónoma del Caribe

Colombia

Corte P., Danitza M.; Sierra V., Fabio; Valencia O., Guillermo E.  
Validación del modelo matemático “Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de Weibull”, evaluando el recurso eólico en la zona del Caribe colombiano: caso estudio  
PROSPECTIVA, vol. 13, núm. 2, julio-diciembre, 2015, pp. 38-46  
Universidad Autónoma del Caribe

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250642005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Validación del modelo matemático “Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de Weibull”, evaluando el recurso eólico en la zona del Caribe colombiano: caso estudio

## Mathematical model validation “Probability Density Function (PDF) of Weibull” assessing the wind resource in colombian Caribbean area: case study

Danitz M. Corte P.<sup>1</sup>, Fabio Sierra V.<sup>2</sup>, Guillermo E. Valencia O.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ms (c) Ing. Grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética MDLYGE. Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup>PhD. Ing. Mecánico. Profesor Titular. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. Grupo de Investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética MDLYGE. Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup>Ms. Ing. Mecánico. Profesor Asistente. Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico. Grupo de Investigación Gestión Eficiente de Energía, Ká. Barranquilla, Colombia.

E-mail: guillermoevalencia@mail.uniatlantico.edu.co.

Recibido 28/11/14,  
Aceptado 15/06/2015

Cite this article as: D. Corte , F. Sierra, G. Valencia, “Mathematical model validation “Probability Density Function (PDF) of Weibull” assessing the wind resource in colombian Caribbean area: case study”, *Prospect*, Vol 13, N° 2, 38-46, 2015.

### RESUMEN

Este artículo presenta el análisis de las mediciones de la velocidad del viento para una estación meteorológica localizada en la ciudad de Barranquilla, zona norte de Colombia, por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), en los años 2012 y 2013, utilizando medidas de tendencia central e histogramas de frecuencia relativa y absoluta, que permiten estimar las velocidades más frecuentes en esta zona. A partir de las funciones de densidad de probabilidad de Weibull (PDF) calculadas a partir de los histogramas para los años 2012 y 2013, fue posible predecir el comportamiento de la velocidad del viento para el año 2014, incurriendo en pequeños errores estadísticos en la predicción, lo cual permitió obtener una caracterización del recurso eólico en el lugar más acertada, posibilitando el desarrollo de modelos para convertirla potencia del viento en energía eléctrica.

**Palabras clave:** Energía eólica, Velocidad de viento, Modelos matemáticos, Distribuciones estadísticas.

### ABSTRACT

This paper presents the wind speed measurements analysis for a weather station located in Barranquilla city, northern in Colombia, by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia (IDEAM), for the years 2012 and 2013, using measures of central tendency, relative and absolute frequency histograms, that allow estimate the most frequently velocity in this zone. From probability density function (pdf) of Weibull calculated from the histograms for the years 2012 and 2013, it was possible to predict the behavior of the wind speed by 2014, incurring small statistical errors in the prediction, which allowed a successful wind resource characterization of the place, enabling the development of models to convert the wind power to electrical energy.

**Keywords:** Wind energy, Windspeed, Mathematical models, Statistical distributions.

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica ha tenido una exploración importante a causa del enfoque que se le está dando a las energías renovables. La utilización eficaz del recurso eólico implica tener un detallado conocimiento de las características de este recurso en la zona de estudio. En los últimos años se ha investigado que las aplicaciones de los diferentes modelos de distribución de densidad de probabilidad, para la estimación de las velocidades de vientos en una serie de tiempo son una buena herramienta para caracterizar el fenómeno[1].

Para la programación del modelo adecuado para estimar la velocidad del viento, es conveniente emplear una serie de tiempo prevista para la adquisición de los datos de la velocidad del viento, en un rango de tiempo de cada 30 minutos, obteniendo una integración de los datos para su análisis estadístico preliminar, lo cual fue tenido en cuenta para el respectivo estudio de la disponibilidad del recurso eólico en la región Caribe Colombiana. A partir de las mediciones registradas, fue posible identificar y verificar la distribución estadística para los datos de la estación meteorológica estudiada.

Algebraicamente, la función de distribución Weibull tiene una estructura matemática claramente definida, pero encontrar los parámetros de forma y de escala requiere de un procedimiento no tan trivial, que debido a su naturaleza no lineal requiere de métodos numéricos o métodos gráficos que hacen uso de escalas logarítmicas, el cual fue utilizado en el presente caso de estudio. Con el fin de validar el modelo, se estimaron los parámetros a partir de la información medida de los años 2012 y 2013, y se realizó una comparación entre la proyección y los datos medidos para este en el año 2014, encontrando un buen ajuste del modelo desarrollo, por lo que el modelo puede ser utilizado para estimar la velocidad del viento que más se repite en la zona de estudio.

## 2. TEORÍA/METODOLOGÍA

### 2.1 Disponibilidad del Recurso eólico

El recurso eólico ha sido explotado inicialmente por medio de pequeños molinos de viento, así como en centrales eléctricas y grandes parques eólicos, siendo este actualmente una fuente alternativa de energía renovables, con gran rentabilidad y eficiencia como se muestra en el reporte de la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA) [2].

Como se muestra en la tabla 1, a nivel mundial la energía eólica ha alcanzado un crecimiento en su explotación y aprovechamiento en los países europeos, seguido por el Asia pacífica gracias a sus costas, que

debido a su capacidad energética es útil para la instalación de nuevas tecnologías, motivada por nuevas políticas energéticas que han permitido un aumento la explotación de estos recursos no renovables, en países desarrollados que han permitido disminuir la contaminación del medio ambiente [3].

**Tabla 1.** Crecimiento de la capacidad mundial instalada para el año 2012 Global WindReport [4].

**Table 1.** Growth of the world capacity installed for the year 2012 Global WindReport [4].

País	GW instalados		
	2011	2012	Total a 2012
África y Medio Oriente	1,03	0,10	1,14
Asia	82,07	15,51	97,57
Europa	97,04	12,74	109,58
América Latina y el Caribe	2,28	1,23	3,51
Norte América	52,76	14,86	67,58
Región Pacífica	2,86	0,36	3,22
<b>Total</b>	<b>238,05</b>	<b>44,80</b>	<b>282,59</b>

La tendencia de crecimiento en los países desarrollados se le asocia la inversión en proyectos de avances tecnológicos, para el desarrollo de otras fuentes de energía con el fin de fortalecer y diversificar la matriz energética atendiendo a criterios de punto de equilibrio entre la rentabilidad y la disminución del impacto ambiental[3].

Colombia posee un significativo potencial eólico debido a su buena ubicación geográfica y favorable rugosidad de sus terrenos, por lo que en la medida que estos recursos sean explotados de manera eficiente, se obtendrán importantes cantidades de energía eólica generada en el país.

Actualmente, en la región del Caribe colombiano existe una capacidad energética total instalada de 19.5MW nominal, siendo esta la región de Sudamérica que posee vientos similares a la Patagonia de Chile y Argentina[5]. Esta diversidad de recursos energéticos que a gran escala se acerca a los niveles de competitividad en la generación de energía eléctrica para el consumo, es debido a los recursos disponibles del viento en esta zona, los cuales por lo general son 10 veces más que la disponibilidad que posee los recursos hídricos en la tierra[6].

Partiendo de los estudios realizados en Colombia y los reportes de velocidades de vientos reportados, ya sea por el IDEAM, o por datos tomados experimentalmente, existen diversas zonas en Colombia que posee las características mínimas para la implementación de sistemas eólicos, tales como la velocidad, la dirección, la humedad y la turbulencia que debe tener el recurso en la zona seleccionada [7].

En esta región del Caribe se viene evaluando el recur-

so eólico, de tal manera que ya existen varias estaciones meteorológicas instaladas, que miden las características que el viento posee para su modelamiento matemático y su proyección a futuro, generando así un avance tecnológico en la construcción de prototipos eólicos que den paso a la generación de energía eléctrica en zonas alejadas del sistema interconectado (SIN), que garanticen una reducción en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y gases de efecto invernadero (GEI), que no contaminen el medio ambiente y afecten la salud humana[8].

Con el objetivo de hacer la validación del recurso eólico en esta zona del Caribe colombiano, se ha determinado como caso estudio, una estación meteorológica ubicada en la ciudad de Barranquilla (Colombia), como lo muestra la figura 1, en la que se muestra la posición exacta de la estación, y atienden a mediciones generadas en un contexto urbano real, las cuales después de un proceso de identificación y análisis detallado del viento permiten estimar la distribución y proyección estadística.

**Figura 1.** Ubicación de la estación meteorológica en la zona urbana de Barranquilla (Colombia).

**Figure 1.** Location of weather stations in the urban area of Barranquilla (Colombia).



Fuente: Elaborado por los autores

## 2.2 Caracterización del viento en la zona

El viento se le asocia al aire en movimiento, como consecuencia del calentamiento desigual del aire en la superficie terrestre y la rotación de la tierra que a su vez crean unos patrones globales de circulación del aire en la atmósfera, los cuales varían según la zona, área y la época del año. Esta circulación de aire es determinada por distintos factores tales como la velocidad y dirección del viento, las características topográficas y la densidad del aire.

En terrenos montañosos el aire circulante adquiere una

aceleración en dirección ascendente, mientras que en las costas el viento viene en dirección horizontal paralela al mar y cambia su dirección por los obstáculos que ofrecen la alta y densa vegetación, disminuyendo la velocidad, aumentando la turbulencia y generando una baja potencia eólica. Esta turbulencia es proporcional a los obstáculos que el aire encuentra en toda su trayectoria, estos obstáculos físicos son llamados Efectos de Capa Limite Atmosférica[5].

El movimiento de las masas de aire origina cambios en la temperatura, que a su vez la radiación solar sobre la superficie terrestre ocasiona un aumento del 10% en la velocidad del aire en superficies planas.

El sol irradia 174.423 TW de energía por cada hora de radiación y el flujo de energía solar absorbida por la tierra es de alrededor de los  $1,74 \times 10^{17}$  W de potencia, por lo que el 1% y 2% de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica. Esto supone un potencial de energía eólica de 53 TWh/año, lo cual es cinco veces más que el actual consumo eléctrico en el mundo. Por lo tanto, en teoría la energía eólica permitiría atender las necesidades energéticas del mundo[9].

Con el fin de desarrollar la estimación de los parámetros del modelo de Weibull, inicialmente se realizaron los cálculos de las funciones estadísticas que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Definición de las funciones estadísticas preliminares.

**Table 4.** Definition of the preliminary statistics functions.

<b>Media Aritmética</b>	$\bar{x} = \frac{-x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N}$ $= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$
<b>Varianza</b>	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$
<b>Desviación Estándar</b>	$\sigma = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right] / (n - 1)}$

Fuente: Elaborado por los autores

Después de realizar la caracterización de la información medida se procedió al ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad continua, escrita por Waloddi Weibull en 1951 [10], este método se centró específicamente para energía eólica, debido a su flexibilidad, en cuanto a los parámetros que determinan las características del viento y la zona, ajustándose a los datos experimentales.

La Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de Weibull cuya ecuación está dada por dos parámetros "K" y "C" que son los parámetros de forma y de escala respectivamente precisando la distribución de Weibull, como lo muestra la ecuación [11].

$$f(v) = \frac{K}{C} \left( \frac{v}{C} \right)^{K-1} \exp \left[ -\left( \frac{v}{C} \right)^K \right] \quad (1)$$

Donde el parámetro de forma "K" no tiene unidades y se puede obtener de la siguiente manera:

$$K = \left( \frac{\sigma}{v_{prom}} \right)^{-1.086} \quad (2)$$

En este caso sigma( $\sigma$ ) es la desviación estándar obtenida a partir de la gráfica de la velocidad con respecto al tiempo. Para el factor de escala, las unidades son las mismas de la velocidad que para este caso es en m/s y está dada así [12]:

$$C = \frac{v_{prom}}{\left( \gamma \left( 1 + \frac{1}{K} \right) \right)} \quad (3)$$

Los valores de x deben estar contenidos entre 1 y 2, para este parámetro, debido a que si el parámetro de forma es superior a 2, esta toma la función de distribución de RAYLEIGH, que es una distribución que parte de Weibull y puede variar en el análisis [13] y [14].

A partir de los valores de los parámetros de forma y de escala se sustituyen en la ecuación 1 y se logra conocer la distribución ajustada a la información del recurso eólico en la zona, la cual se puede graficar junto a la gráfica del histograma de frecuencia.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Análisis de los datos registrados

La estación meteorológica estudiada se encuentra ubicada en la ciudad de Barranquilla como lo muestra la figura 1, en la cual se obtuvieron mediciones de velocidad y dirección del viento.

Para esta zona específica del Caribe colombiano se realizó la medición del recurso eólico, con una frecuencia de muestreo de 30 min, como se muestra en las tablas 2 y 3, almacenando dos datos por cada hora de para los años 2012 y 2013

**Tabla 2.** Características de datos registrados de estación meteorológica para el año 2012.

**Table 2.** Recorded data features of weather station for 2012.

Estación	Tiempo Inicial	Tiempo Final	Datos no Nulos	Datos en cero	Total de Datos	Promedio de la Velocidad (m/s)	% de Frecuencia de datos en Cero	% de Frecuencia de los datos
AÑO 2012								
<b>ENERO</b>	01/01/12	31/01/12	1458	30	1488	2,2051	2,016	97,984
<b>FEBRERO</b>	01/02/12	01/02/12	29	0	29	2,8635	0,000	100,000
<b>MARZO</b>	01/03/12	31/03/12	950	48	998	1,9743	4,810	95,190
<b>ABRIL</b>	01/04/12	30/04/12	883	558	1441	0,6804	38,723	61,277
<b>MAYO</b>	01/05/12	31/05/12	803	686	1489	5174	46,071	53,929
<b>JUNIO</b>	01/06/12	30/06/12	836	605	1441	0,7576	41,985	58,015
<b>JULIO</b>	01/07/12	31/07/12	1221	268	1489	1,3358	17,999	82,001
<b>AGOSTO</b>	01/08/12	31/08/12	839	650	1489	0,6382	43,653	56,347

Fuente: Estación Meteorológica Ciudad de Barranquilla - Colombia, 2012

Debido a problemas de funcionamiento de la estación meteorológica su registro fue intermitente y solo están disponibles los últimos cuatro meses de cada año, creando así un registro total de los primeros 8 meses del año, es decir de enero hasta agosto de los dos años registrados, por lo que los datos mostrados en las tablas 2 y 3, se encuentran divididos por meses a partir de enero hasta

agosto. Estos datos se han agrupado para determinar el promedio de la velocidad de cada mes registrado y así realizar el modelamiento y validación del modelo estadístico. En las mediciones realizadas, no se registraron datos ausentes, eso manifiesta que la estación meteorológica no presentó errores en la recopilación ni en la transmisión de los datos de velocidad del viento.

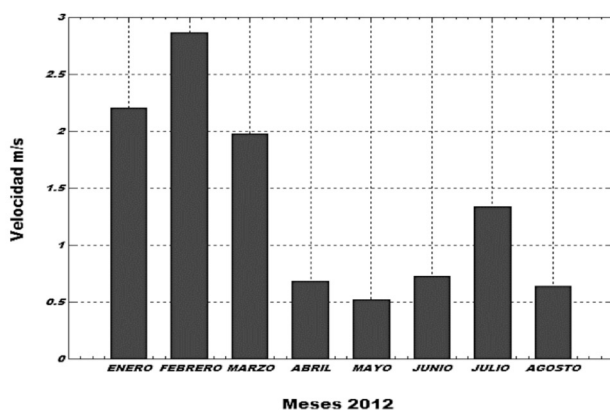


**Tabla 3.** Características de datos registrados de estación meteorológica para el año 2013.**Table 3.** Recorded data features of weather station for 2013.

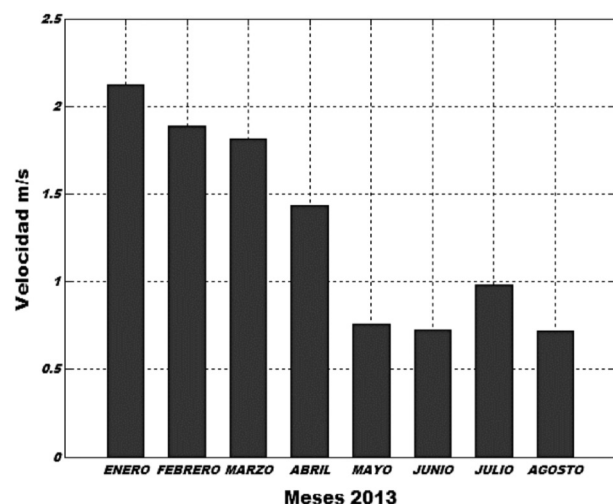
Estación	Tiempo Inicial	Tiempo Final	Datos no Nulos	Datos en cero	Total de Datos	Promedio de las Velocidad (m/s)	% de Frecuencia de datos en Cero	% de Frecuencia de los datos
<b>AÑO 2013</b>								
<b>ENERO</b>	01/01/13	31/01/13	1441	48	1489	2,1204	3,224	96,776
<b>FEBRERO</b>	01/02/13	01/02/13	817	80	897	1,8857	8,919	91,081
<b>MARZO</b>	01/03/13	31/03/13	1291	198	1489	1,8159	13,298	86,702
<b>ABRIL</b>	01/04/13	30/04/13	1227	214	1441	1,4364	14,851	85,149
<b>MAYO</b>	01/05/13	31/05/13	789	700	1489	0,7573	47,011	52,989
<b>JUNIO</b>	01/06/13	30/06/13	859	582	1441	0,7242	40,389	59,611
<b>JULIO</b>	01/07/13	31/07/13	1080	409	1489	0,9782	27,468	72,532
<b>AGOSTO</b>	01/08/13	31/08/13	22	10	32	0,7216	31,250	68,750

El valor más alto de la velocidad del viento registrado durante el año 2012, se produjo en los meses de enero y marzo, con un registro de 5.77 m/s y con relación al año 2013 el mes que registró la máxima velocidad fue en marzo con 6.21 m/s.

La adquisición de los datos se realizó por periodos de tiempo de 30 minutos, permitiendo así conocer las variaciones de velocidad y los promedios de los mismos para cada uno de los 8 meses registrados en los años 2012 y 2013, como se observa en las figuras 2 y 3, determinando el comportamiento del viento en la zona.

**Figura2.** Histograma de la velocidad del viento para el período de 2012.**Figure 2.** Histogram of the wind speed for the 2012 period.

Fuente: Elaborada por el autor

**Figura3.** Histograma de la velocidad del viento para el período 2013.**Figure 3.** Histogram of the wind speed for the 2013 period.

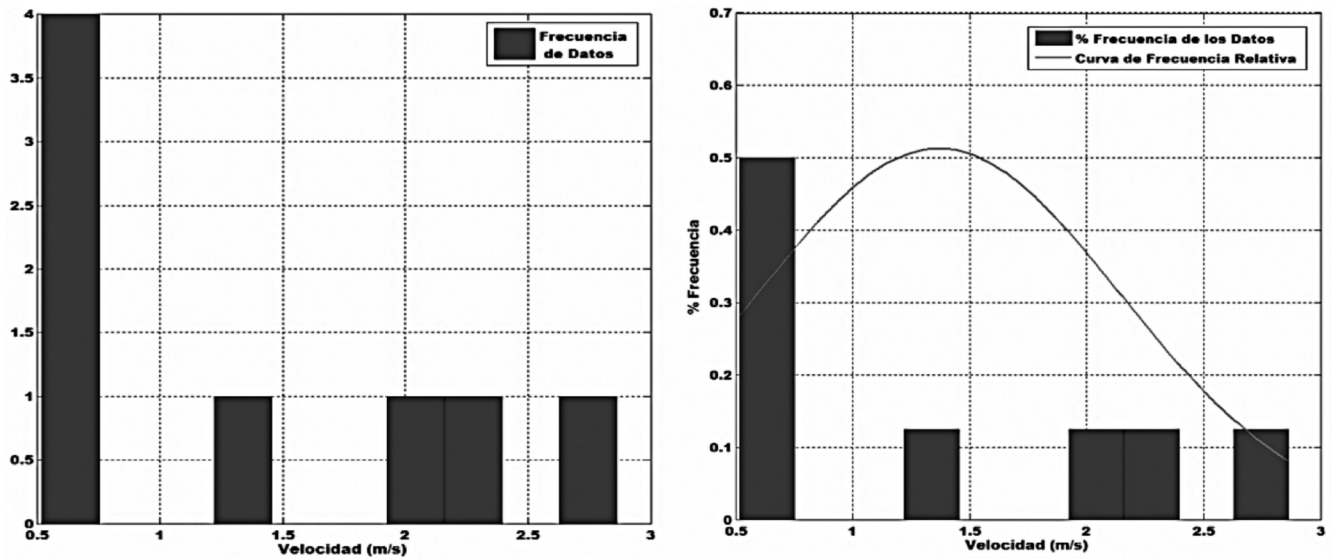
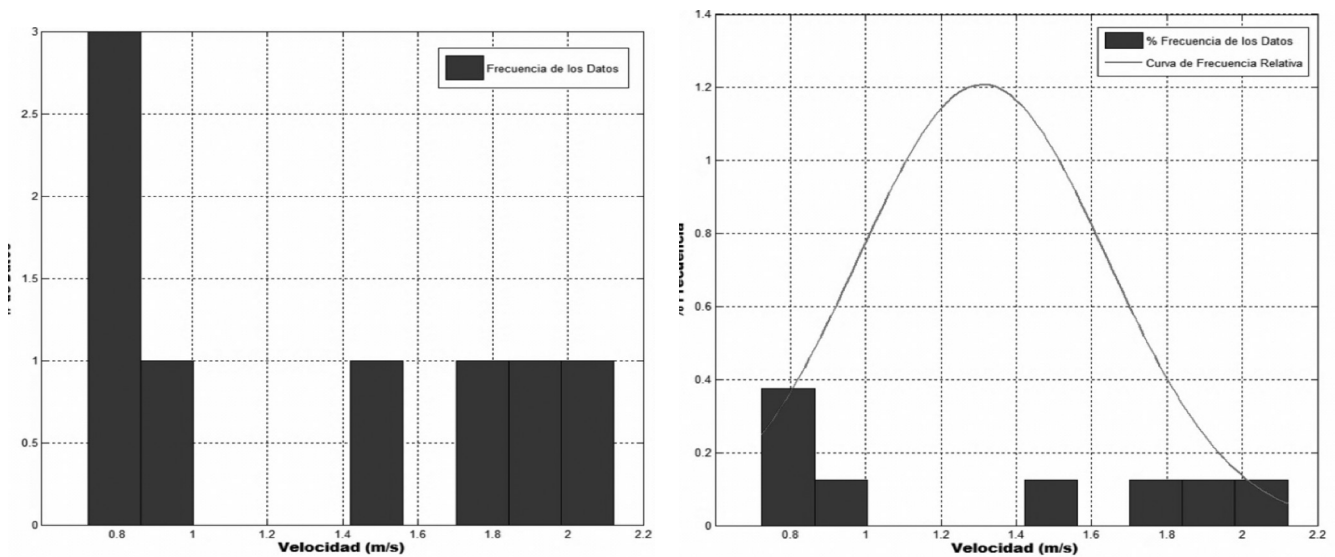
Fuente: Elaborada por el autor

Con la información precisa de las velocidades de viento, se observa que los primeros meses de los dos años registrados, son en los que su promedio de la velocidad es más elevada, asumiendo que la ubicación de la estación es favorable.

### 3.2. Análisis estadísticos y validación del modelo matemático

Para el análisis de los datos registrados del recurso eólico se desarrolló un código en Matlab con su interface de usuario, como herramienta que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE), y un lenguaje propio para la manipulación de matrices, representando las funciones en forma de algoritmos para observar las tendencias del recurso eólico en la zona.

A partir del método de evaluación se realizó el análisis estadístico, en donde se obtuvieron las velocidades del viento en términos de distribuciones de frecuencia y frecuencia relativa, como se muestra en la figura 4 y figura 5.

**Figura4.** Histograma de Frecuencia y Frecuencia Relativa para el año 2012.**Figure4.** Histogram of Frequency and Relative Frequency for the year 2012.**Figura5.** Histograma de Frecuencia y Frecuencia Relativa para el año 2013.**Figure 5.** Histogram of Frequency and Relative Frequency for the year 2013.

Fuente: Elaborada por el autor

Fuente: Elaborada por el autor

En la figura 4 se observa la distribución en términos de frecuencia de las velocidades de viento para el año 2012; las velocidades que se encuentran en el rango de 0 a 1 m/s son el 50% de los datos registrados; con relación a las demás velocidades de viento su porcentaje es de 12.5% para las velocidades contenidas entre 1 y 2.75 m/s. En la curva de frecuencia relativa se percibe que la mayoría de los datos de velocidad de viento están registrados al lado izquierdo de la gráfica, indicando que se encuentran en un rango de 0 y 2 m/s; en contraste con la figura 5 que suministra información del año 2013.

Para la figura 5, el histograma de frecuencia varía la condición en cuanto al porcentaje, debido a que para el año 2013, solo el 37.5% de los datos se registraron con una velocidad de viento entre 0.5 y 1 m/s y el 62.5% restante son velocidades entre 1 y 3 m/s. Por lo anterior, la curva de frecuencia relativa presenta un comportamiento más real, debido a que los datos registrados se encuentran en un rango de 0.5 y 2 m/s.

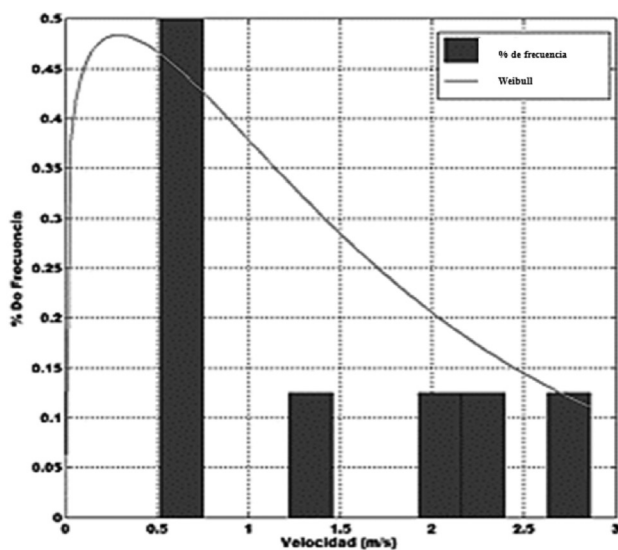
### 3.3. Desarrollo y validación de la distribución de Weibull

La Función de Densidad de Probabilidad (PDF) de Weibull, como una función estadística para el análisis

de viento, que emplea los parámetros K y C mencionados en las ecuaciones 2 y 3, permitido determinar la curva con una tendencia hacia la izquierda como se evidencia en la figura 6, en el cual se asume que las velocidades de viento que se irán a registrar para el siguiente año, mantendrá esta tendencia, es decir los datos estarán ubicados en un rango de 0 a 2 m/s en su gran mayoría.

**Figura 6.** Histograma de velocidad de viento y la curva de la Función de Densidad de Probabilidad de Weibull para el año 2012.

**Figure 6.** Histogram of wind speed and curve of the Probability Density Function of Weibull for 2012.

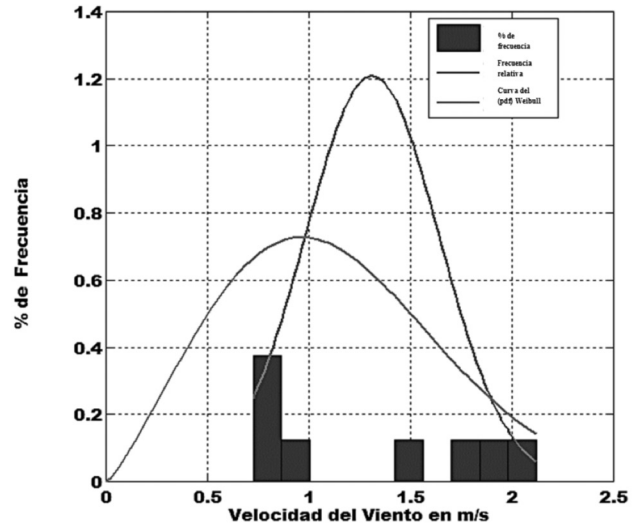


Fuente: Elaborada por el autor

A partir del uso de la herramienta computacional, fue posible validar la distribución de Weibull para los datos de vientos del año 2012, como se muestra en la figura 5, en la cual es evidente que el modelo se ajusta a las proyecciones requeridas para el año 2013, en donde el valor umbral de la velocidad del viento no supera los 2.0 m/s como se observó en la figura 2, con velocidades ubicadas en un mayor porcentaje entre 0 a 1 m/s, por lo que se puede decir que el modelo es eficaz y puede ser utilizado para predecir comportamiento del viento en la zona.

**Figura 7.** Curva de la Función de Densidad de Probabilidad de Weibull y el Histograma de velocidad del viento para el año 2013.

**Figure 7.** Curve of the Probability Density Function of Weibull and the Histogram for wind speed for the year 2013.



Fuente: Elaborada por el autor

Adicionalmente, se observa que para el año 2014 la velocidad del viento estarán en un rango entre 0.2 y 2.3 m/s durante los mismos meses registrados, en la que la mayor parte del tiempo los registros estarán entre 0.5 y 1.5 m/s, lo cual puede asociarse a que la estación se encuentra dentro del área urbana de la ciudad lo que ocasiona que la velocidad del viento se vea afectada por la diferentes edificaciones, disminuyendo la velocidad y aumentando la turbulencia. Finalmente, se puede decir que este modelo de distribución estadístico es una muy buena herramienta de predicción de la velocidad del viento que puede ser utilizada para el análisis de datos de velocidad de viento en diferentes zonas, utilizando datos de registros históricos.

#### 4. CONCLUSIONES

- La energía eólica se puede aprovechar para la generación de energía eléctrica, como un recurso renovable, ya que se encuentra en constante circulación. Por lo anterior, se hace necesario desarrollar y validar métodos sistemáticos para la estimación de los parámetros de escala y forma de la distribución Weibull para la predicción del potencial de energía eléctrica generado a partir de energía eólica, los cuales requieren información registrada por una estación meteorológica localizada en un determinado lugar, como lo fue la ciudad de Barranquilla para el presente estudio.

- Se elaboró una metodología para el tratamiento de



los datos registrados, logrando un análisis más exacto en cuanto al comportamiento del viento para los diferentes registros, determinando así el mismo rango de tiempo para todos los años, que en este caso fue de una hora, creando las condiciones similares para los años 2012 y 2013 en el proceso de programación del modelo de proyección.

- Se determinó a través del modelo matemático de proyección del recurso eólico, el comportamiento del viento para el año 2014, teniendo en cuenta los registros históricos de los años 2012 y 2013 para la zona de estudio. Adicionalmente, se determinó que los parámetros de Weibull  $c$  y  $k$  para los datos estudiados son 5,85 y 4,01, respectivamente, para la distribución de la velocidad del viento. La frecuencia máxima del viento para velocidades comprendidas entre 0 a 1 m/s, y la mínima frecuencias se presentó para velocidades comprendidas entre 1 a 2.75 m/s. En la distribución mensual de la velocidad del viento, el parámetro de forma tenía un valor máximo en febrero, y un mínimo valor en mayo. En el análisis de la estacionalidad, el valor medio de la velocidad del viento fue mayor en el primer semestre del año que en el segundo semestre del año basado en el parámetro de escala.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Grupo de investigación "Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión energética" de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, al Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la energía de la Universidad del Atlántico en Barranquilla, al Consejo de Energía y Minería de Colciencias, a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y a todas las Universidades pertenecientes al convenio de la Red Internacional para la Promoción de la Investigación y Docencia en Energización Rural para el Desarrollo Agroindustrial Sostenible – PRIDERAS, por todo el soporte logístico y financiero requerido para este estudio.

## 6. REFERENCIAS

- [1] A. R. A. A. R. Zaharim, "Fitting of statistical distributions to wind speed data in Malaysia," vol. 26, no. 1, 2009.
- [2] W. W. E. Association., "La Energía Eólica," WWEA, 2009.
- [3] F. ". Ballenilla, "La sostenibilidad desde la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles, un problema socio-ambiental relevante", " Grupo "La Illeta" Investigación en la Escuela , vol. n° 55, .2005..
- [4] G. W. E. C. ., " Global Wind Report Annual markets update," 2012. En línea:. [Online]. Available: [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual\\_report\\_2012\\_LowRes.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf).
- [5] A. Pinilla, L. Rodriguez and R. Trujillo, "Performance Evaluation of Jepirachi Wind Park.," Renewable Energy Journal, pp. 48-52, 2009.
- [6] Q. W. L. X. X. Zhilong, "" Estimating Wind Speed Probability Distributions Using Kernel Density Method.," Electric Power Systems Research 81, vol. 81, pp. 2139-2146 , Canada (2011).
- [7] Carlos Y Jorge, " "Energías Renovables" 2 Edición., " [Online]. Available: [http://www.liceosorolla.es/images/alumnos/2ESOC00607a/Energias-renovables-02\\_03.pdf](http://www.liceosorolla.es/images/alumnos/2ESOC00607a/Energias-renovables-02_03.pdf).
- [8] U. D. P. M. E. -. UPME., ""Guía Para La Utilización De La Energía Eólica Para Generación De Energía Eléctrica", " Documento No. ANC-603-18, Bogotá, Marzo de 2003.
- [9] " Asociación de argentina de energía eólica., " [Online]. Available: [www.argentinaeolica.org.ar](http://www.argentinaeolica.org.ar).
- [10] A. R. A. M. zaharim, "Fitting of statical distributions to wind speed data in Malaysia., " vol. Vol 26, no. N° 1, 2009.
- [11] Z. E. E. G. L. J. Junyi, ""Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study", " no. Energy Conversion and Management 51.
- [12] A. S. S. S., ""Wind Climate Modeling Using Weibull And Extreme Value Distribution", " vol. Vol. 3, no. N° 5, 2011.
- [13] F. Buñuelos, "Impacto De La Generación Eléctrica Usando Fuentes De Energía Eólica En La Red Eléctrica Nacional", Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de México (UNAM), Mayo 2011.
- [14] H.-C. Lim, ""Short-term observation of wind energy potentiality in the Wol-Ryong wind site", " vol. San 30, no. 3711~3721, 2012.
- [15] L. Fjellanger Barstad, "CFD Analysis of a Pelton Turbine".
- [16] Q. Liang, C. Rodríguez, E. Egusquiza, X. Escaler, M. Farhat and F. Avellan, "Numerical simulation of fluid added mass effect on a francis turbine runner," Computers & Fluids, no. 36, p. 1106–1118, 2007.
- [17] S. Derakhshan and A. Nourbakhsh, "Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 32, p. 1620–1627, 2008.

- [18] D. L. Gaden and E. L. Bibeau, "A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydro kinetic turbines using a validated momentum source turbine model," *Renewable Energy*, vol. 35, p. 1152-1158, 2010.
- [19] J. Hellström, B. Marjavaara and T. Lundström, "Parallel CFD simulations of an original and redesigned hydraulic turbine draft tube," *Advances in Engineering Software*, no. 38, pp. 338-344, 2007.
- [20] W.-q. WANG, L.-x. Zhang and Y. YAN, "Large-eddy simulation of turbulent flow considering inflow wakes in a Francis turbine blade passage," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 19, no. 2, pp. 201-209, 2007.
- [21] Z.-d. QIAN, J.-d. YANG and W.-x. HUAI, "NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF PRESSURE PULSATION IN FRANCIS HYDRAULIC TURBINE WITH AIR ADMISSION," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 19, no. 4, pp. 467-472, 2007.
- [22] J.-f. WANG, J. PIECHNA and N. MÜLLER, "A NOVEL DESIGN OF COMPOSITE WATER TURBINE USING CFD," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 24, no. 1, pp. 11-16, 2012.
- [23] V. Prasad, "Numerical simulation for flow characteristics of axial flow hydraulic turbine runner," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 2060-2065, 2012.
- [24] J.-C. MARONGIU, F. LEBOEUF, J. CARO and E. PARKINSON, "Free surface flows simulations in Pelton turbines using an hybrid SPH-ALE method," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 48, pp. 40-49, 2010.
- [25] Z. Čarija, Z. Mrša and S. Fućak, "Validation of Francis Water Turbine CFD Simulations," *Strojarstvo: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 5-14, 2008.
- [26] A. CATANASE and M. BĂRGLĂZAN, "NUMERICAL SIMULATION OF A FREE JET IN PELTON TURBINE," in *The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics*, Timisoara, Romania, 2004.
- [27] K. Patel, B. Patel, M. Yadav and T. Foggia, "Development of Pelton turbine using numerical simulation," in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* / 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2010.
- [28] D. Jošt, P. Mežnar and A. Lipej, "Numerical prediction of Pelton turbine efficiency," in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 12 / 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2010.
- [29] Y. X. Xiao, T. Cui, Z. W. Wang and Z. G. Yan, "Numerical simulation of unsteady free surface flow and dynamic performance for a Pelton turbine," in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 15 / 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2012.
- [30] E. Parkinson, C. Neury, H. Garcian, G. Vullioud and T. Weiss, "Unsteady analysis of Pelton runner with flow and mechanical simulations," in *Hydropower & Dams* / Hydro 2005, Villach, Austria, 2006.
- [31] S. Jain, R. Saini and A. Kumar, "CFD APPROACH FOR PREDICTION OF EFFICIENCY OF FRANCIS TURBINE," *TECHNICAL ARTICLES*.
- [32] M. Asuaje, F. Bakir, S. Kouidri, F. Kenyery and K. Robert, "Numerical Modelization of the Flow in Centrifugal Pump: Volute Influence in Velocity and Pressure Fields," *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 3, pp. 244-255, 2005.
- [33] M. Roth and R. Peikert, "Flow Visualization for Turbomachinery Design," *Computer Society Proceedings of the 7th IEEE Visualization Conference*, pp. 1070-1074, 1996.
- [34] J. De Andrade, C. Curiel, F. Kenyery and O. Aguilon, "Numerical Investigation of the Internal Flow in a Banki Turbine," *International Journal of Rotating Machinery*, no. doi:10.1155/2011/841214, 2011.
- [35] I. Atthanayake, "Analytical Study on Flow through a Pelton Turbine Bucket Using Boundary Layer Theory," *International Journal of Engineering & Technology IJET*, vol. 9, no. 9, pp. 241-245.
- [36] V. Gupta and V. Prasad, "Numerical Investigations for Jet Flow Characteristics on Pelton Turbine Bucket," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. Issue 7, pp. 364 - 370, July 2012.