

Evaluación, predicción y modelación del potencial eólico

Assessment, forecasting and modeling of wind potential

Danitza María Cortes-Pérez, Fabio Emiro Sierra-Vargas, Jorge Eduardo Arango-Gómez

Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá. Colombia.

Correo electrónico: damcortespe@unal.edu.co

Recibido: 22 de junio de 2016

Aceptado: 16 de agosto de 2016

Resumen

Los modelos matemáticos que existen para caracterizar el potencial energético del viento; incluyen los modelos de distribución paramétricos en rangos de velocidades entre 3 y 9m/s (Weibull, Log-Normal) y de 0 a 15m/s (Gamma). En la investigación se diseñó un algoritmo matemático de predicción del recurso eólico analizando las velocidades, direcciones y rugosidad del sitio seleccionado para generar perfiles del viento y la rosa de vientos. Se emplearon series de tiempo, con velocidades desde 0 hasta 15m/s. El sistema analiza los datos a través de la estadística

inferencial, y realiza la proyección mediante la distribución de modelos paramétricos. El algoritmo se validó con datos de dos sitios en Colombia: la estación de Puerto Bolívar y la estación de Usme, comparando los valores simulados mediante el algoritmo propuesto y los modelos tradicionales, obteniendo una óptima correlación de datos en el rango ampliado de 0 a 15 m/s.

Palabras claves: potencial eólico, modelo matemático, modelo estadístico, programa computacional.

Abstract

The mathematical models exist to characterize the wind energy potential, include parametric distribution models in speed ranges from 3 and 9m/s (Weibull, Log-Normal) and de 0 a 15m/s (Gamma). In research was designed a mathematical prediction algorithm for the wind resource analyzing the speeds, directions and roughness of the selected site to generate wind profiles and the wind rose. Time series were used with speeds from 0 to 15 m/s.

The system analyzes the data through inferential statistics and performs projections by distribution of parametric models. The

algorithm was validated with data from two sites in Colombia: The Puerto Bolivar station and Usme station. Comparing the simulated values using the proposed algorithm and the traditional models, obtaining an optimal correlation in the expanded range data of 0 to 15 m/s.

Key words: wind potential, mathematical model, statistical model, computational program.

Introducción

La energía eólica ha tenido un desarrollo importante a causa del enfoque dado a las Energías Renovables en el mundo. La capacidad instalada a nivel mundial no se encuentra distribuida de manera uniforme, en el año 2012 se registró un total de 282,59 GW instalados; donde 109,58 GW pertenecen a Europa, un 97,57 GW a Asia, 67,58 GW en Norte América, 3,22 GW en la región Pacífica, 1,14 GW en África y medio oriente y 3,51 en América Latina y el Caribe. En Colombia solo se han instalado 19,5 MW [1].

En los últimos años se han reportado estudios relacionados con la predicción del recurso eólico. La información cuantitativa asociada a la energía eólica y su generación, proporciona distintos métodos como las predicciones probabilísticas (paramétricas y no paramétrica), las previsiones de índice de riesgo y proyecciones de espacio-tiempo, en rangos muy cortos, cortos, medianos y largo plazo.

Dentro de los enfoques paramétricos, basados en predicciones de densidad de acuerdo al conjunto de parámetros, se desarrollan cuatro aspectos que incluyen la distribución predictiva, los parámetros de localización, de escala y la evaluación. De igual forma el método de estimación adaptativa, permite cambios en los parámetros del modelo que estén afectados por factores como la estacionalidad, el clima, el envejecimiento, las fallas y mantenimiento [2]

La investigación consiste en la elaboración de un algoritmo enfocado a la determinación de las características del viento a partir de un registro de velocidades en las zonas de estudio, útiles para el aprovechamiento del recurso eólico. Utilizando la identificación de las investigaciones realizadas en la literatura, se establece un análisis estadístico preliminar relacionado con la media aritmética, desviación estándar, varianza y kurtosis; además de las funciones de distribución de probabilidad *Probability Distribution Function*, PDF, más adecuadas, capaces de representar mejor los datos de la velocidad del viento como Weibull, Log-Normal y Gamma. Estos modelos de distribución son paramétricos se ajustan al análisis de proyección del recurso eólico, gracias a que los parámetros de forma y de escala se procesan aleatoriamente según los datos registrados los cuales están afectados por el tiempo y la rugosidad del terreno de las zonas de estudio. A partir del algoritmo se programa una interfaz gráfica de usuario (el lector puede solicitar al autor esta interfaz) en el *Guide* del software MatLab 2014b empleando el lenguaje C++. Otra de las características del algoritmo es que determina el perfil de viento, la densidad de potencia a la altura de referencia, el perfil de

potencia a diferentes alturas y la rosa de vientos, que describen la disponibilidad del recurso eólico y el comportamiento del viento, a partir del registro de datos de velocidad, temperatura y dirección, en rangos altos, medios y bajos, empleados por el usuario, dada la flexibilidad que posee el programa para ejecutar el algoritmo.

El objetivo del trabajo fue desarrollar un algoritmo a partir de las velocidades de viento, en series de tiempo altos, medios y bajos que corresponden con las características de la zona seleccionada, seguido de la adquisición de los datos de velocidad, dirección y temperatura, contenidos en la hoja de cálculo que se encuentra anexa al programa. La interfaz obtenida realiza una serie de iteraciones, analizando los datos, con el fin de que el usuario caracterice la zona y observe el comportamiento del viento; para lograr un máximo aprovechamiento del recurso eólico y el desarrollo de diversos proyectos tecnológicos.

Análisis teórico

Descripción de las estaciones seleccionadas

La estación meteorológica Puerto Bolívar, se encuentra ubicada en el norte del Caribe colombiano en La Guajira, (ver Fig. 1) a una temperatura que está entre los 35 °C y 40 °C, con una elevación de 10 metros sobre el nivel del mar. El sitio posee una buena exposición al viento, los cuales son predominantes desde el norte del país. El terreno es desértico y seco no posee obstáculos importantes, la vegetación es baja.

La estación meteorológica Usme se encuentra ubicada en la Región Andina en la localidad de Usme en la ciudad de Bogotá D.C., como muestra la figura 1, con una temperatura que oscila entre los 12 °C y 15 °C, con una elevación de 3086 msnm. El sitio posee una buena exposición al viento, su ubicación es estratégica, se encuentra en lo alto de la montaña llamada Entre Nubes. Allí los vientos, predominan desde el sur, el terreno no posee obstáculos que generen turbulencias es una zona, con baja vegetación y edificaciones que no interrumpe la circulación del viento.

La base de datos de velocidad y dirección del viento, se registraron en una elevación de 10 metros, sobre el nivel de piso terminado.



Fig. 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas. Tomado de Google Map

La información de los datos experimentales de las estaciones meteorológicas, es suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, la que contiene los registros de las velocidades, dados en metros por segundo, la temperatura en grados centígrados y la dirección de los vientos. Estos registros son diferentes, debido a que se encuentran en función de la posición geográfica.

Para el desarrollo del algoritmo se efectuó la modelación matemática determinando los patrones de comportamiento del viento en la zona, especificando en el algoritmo planteado y el ajuste de los datos experimentales para expresarlos matemáticamente según [3].

Determinación del perfil vertical de la velocidad del viento

La velocidad del viento varía con relación a la altura, debido a la fricción ejercida por la superficie de la tierra, la representación de este comportamiento con relación a la altura, se conoce como el perfil vertical del viento o perfil de viento, expresado mediante la fórmula logarítmica en la [ecuación 1](#) [4]

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{Z_0}\right)} \quad (1)$$

El parámetro denominado longitud de rugosidad Z_0 , siendo este la capacidad que tiene la superficie de la tierra de influir sobre la velocidad y la circulación del viento. El parámetro Z_0 se clasifica según las superficies irregulares o rugosas, lisas, aguas (ríos, mares y aguas estancadas) y aeropuertos, influyendo en la velocidad del viento en determinado sitio [5].

El valor de Z_0 , que se relaciona en la [ecuación 1](#), la cual se encuentra contenido en la tabla de rugosidades para tal efecto [5], a partir de las características y elementos del terreno del sitio que sea seleccionado según la posición geográfica y topográfica. Aplicando la [ecuación 1](#), se determina las variaciones de velocidad con respecto a diferentes alturas de 20, 30, 40 y 50 m, teniendo en cuenta la altura de referencia.

Modelación matemática del recurso eólico

Análisis Estadístico Preliminar

El análisis estadístico que se utilizó, para la determinación del comportamiento del viento se aplicó la estadística inferencial, estimando las condiciones iniciales del viento. De acuerdo con las variaciones espaciales de la velocidad del viento, incluidas en el análisis como la velocidad promedio del viento, la desviación estándar, la varianza y la kurtosis, para el tratamiento de los datos registrados de velocidad y así evaluar posteriormente las funciones de densidad de probabilidad, en el algoritmo propuesto, ya que son los parámetros iniciales del programa. [6, 7]

Funciones de densidad de probabilidad estadística

Las funciones estadísticas de proyección, son también funciones de frecuencia en la que la velocidad promedio del viento es considerado un parámetro fundamental, ya que es un periodo de proyección que aproxima a un análisis del comportamiento real del mismo. Las funciones de densidad de probabilidad son indispensables para el desarrollo del algoritmo en la herramienta computacional. La presente investigación trabajará las siguientes funciones de densidad de probabilidad.

Distribución de Weibull

La función de distribución de probabilidad es una función continua, centrada específicamente para proyectar las velocidades de viento y lograr un mejor aprovechamiento del mismo, para la generación de energía eléctrica o mecánica. La flexibilidad, sencillez y confiabilidad que posee el modelo, se debe a los parámetros de forma K y de escala C , que determinan las características, ajustándose a los datos experimentales, como lo muestra la siguiente [ecuación 2](#) [8]:

$$f(v) = \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left[-\frac{[V_{prom.}]^k}{C} \right] \quad (2)$$

Dónde $f(v)$, es la probabilidad de que ocurra una velocidad a proyectar con relación a los parámetros que se definan en el algoritmo.

K : factor de forma, es la propiedad estadística de desviación estándar que se obtiene a partir de la velocidad del viento con respecto al tiempo, siendo este un parámetro adimensional, [ecuación 3](#).

$$K = \left(\frac{\sigma}{v_{prom.}} \right)^{-1,086} \quad (3)$$

C : factor de escala, está contenido por el promedio de la velocidad del viento durante el periodo seleccionado, [ecuación 3](#) y la expresión de la función Gamma, [ecuación 4](#), cuyas las unidades son m/s.

$$C = \frac{V_{prom.}}{\left(\gamma \left(1 + \frac{1}{K} \right) \right)} \quad (4)$$

$$\gamma \left(1 + \frac{1}{K} \right), \approx \gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad 1 \leq x \leq 2 \quad (5)$$

Aplicando este modelo de Weibull se desarrolló el algoritmo, usándose como proceso iterativo en el *Guide* programado.

Distribución Log-Normal

Esta distribución de probabilidad, es una variable aleatoria, en la que el logaritmo se encuentra distribuido en todas sus variables; teniendo una restricción cuando este obtiene un valor de cero. Sus valores deben estar contenidos en un rango mayor a cero, especialmente valores grandes. La distribución es adaptable para trabajar histogramas de velocidad de viento, ya que sus valores se encuentran en el rango definido por la [ecuación 6](#).

$$F(x) = \frac{1}{X \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln X - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Para la [ecuación 5](#), el parámetro de escala es μ , siendo la mediana de los datos de velocidad. El parámetro de forma σ , es una variable aleatoria reemplazada por la desviación estándar. La aplicación de esta distribución, permite que los datos obtenidos se aproximen a una distribución normal asimétrica. La función posee una condición, que si existen valores negativos la función se limita perdiendo la validez y confiabilidad del procedimiento matemático, por tal razón no es necesario que se programe un proceso iterativo, su desarrollo programático es de tipo estándar.

Distribución Ganma

La distribución de densidad de probabilidad Gamma, es una variable discreta, aplicada para la descripción de superficies y distribuciones de velocidad del viento, [ecuación 7](#).

$$F(x) = \frac{1}{\beta\tau(\alpha)} \left(\frac{X}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{X}{\beta}\right) \quad (7)$$

α : parámetro de forma.

β : parámetro de escala.

Esta distribución Gamma captura parcialmente las características de los histogramas de velocidad del viento, dado que es necesario tener en cuenta las características geográficas acopladas al PDF. La evaluación de los parámetros se desarrolla numéricamente por separado, debido a que la distribución es una variable discreta y aleatoria.

Densidad de potencia disponible del viento

La potencia eólica disponible en el viento depende de tres factores: el área de sección transversal por donde pasa el viento, la densidad del aire y la velocidad del viento; es decir, la densidad de potencia expresa la energía contenida en el viento por metro cuadrado. [9]

La densidad de potencia es directamente proporcional a la velocidad promedio del viento elevada al cubo y la densidad del aire. La variación de la densidad de potencia tiene en cuenta las variaciones del aire respecto a la altura en msnm, lo que lleva a un cambio de potencia en distintas zonas, así estas tengan una misma velocidad del viento. La potencia disponible esta expresada en W/m^2 , y es determinada por la [ecuación 8](#).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{prom}^3 \quad (8)$$

La densidad del aire ρ es la medida experimental realizada en la zona que varía con respecto a la altura. La densidad de potencia Pd/A , se define en la siguiente [ecuación 9](#).

$$\frac{Pd}{A} = \frac{1}{2} \rho V_{prom}^3 \quad (9)$$

Las estimaciones de la densidad de potencia, obedecen a las variaciones de la velocidad del viento durante un periodo de tiempo.

La determinación del potencial eólico, cumple un proceso de observación, adquisición, compilación, procesamiento e interpretación de la información, dadas las características del viento en el sitio. Una vez se conoce la potencia del viento a una altura de referencia, se estima un perfil de potencia con relación a las velocidades desde los 10 m hasta los 50 m de altura.

Descripción del algoritmo de cálculo

El algoritmo, está diseñado, para determinar el comportamiento del viento y las características de la zona, para la implementación de un sistema de generación de energía a partir del viento.

El algoritmo comprende todo un análisis estadístico inferencial como base para la solución de los modelos paramétricos de distribución, el perfil del viento, la densidad de potencia eólica y su variación con respecto a la altura y la rosa de vientos, [figura 2](#).

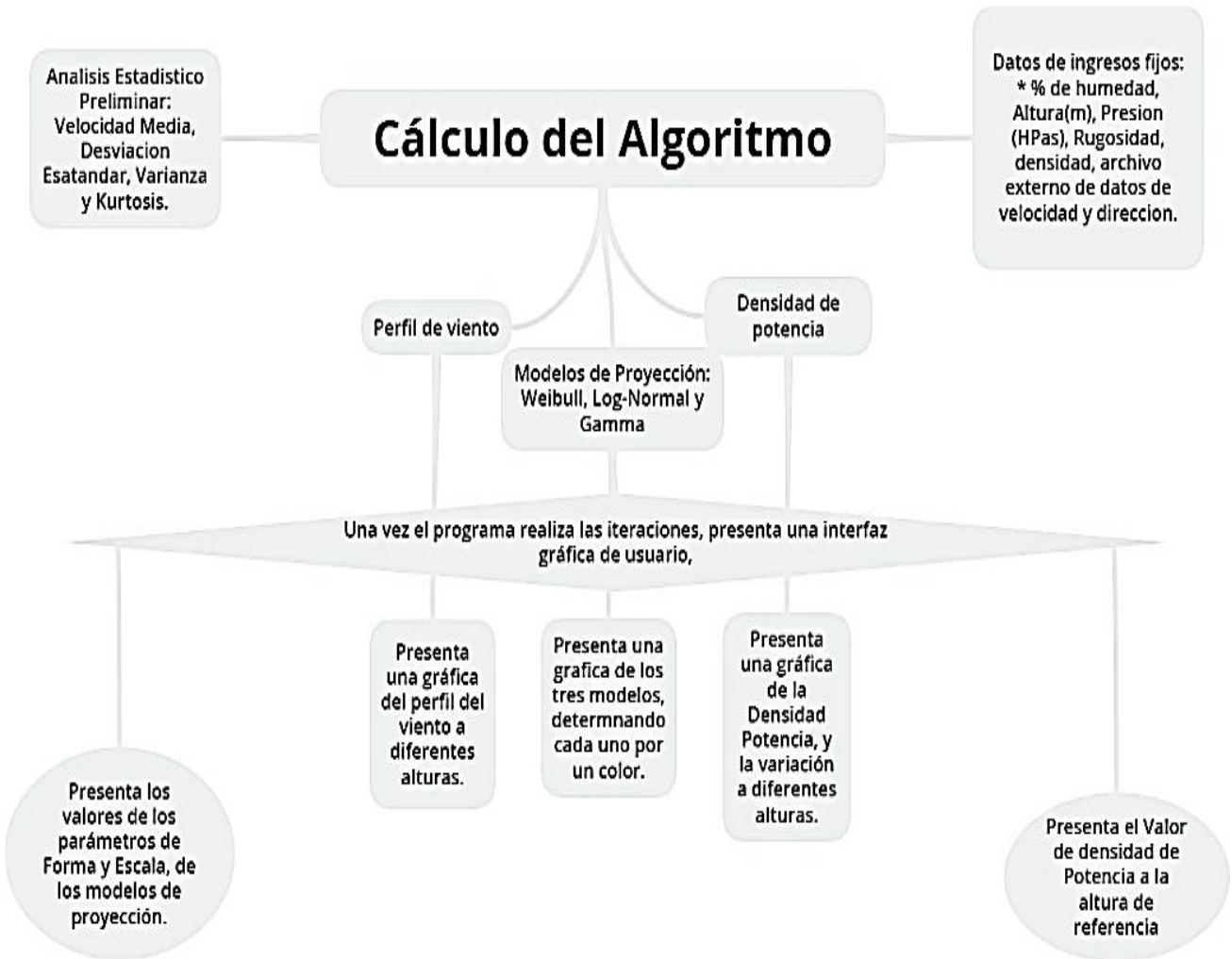


Fig. 2. Algoritmo de cálculo. Fuente: elaboración propia

La estructura secuencial del algoritmo, está diseñado para determinan el comportamiento y la proyección del viento en un tiempo posterior de los datos ya registrados. El *Guide* se programó de tal forma, que utiliza un archivo (hoja de cálculo) que contiene una matriz de datos de temperatura, velocidad y dirección de viento; que se aplica para el proceso de cálculo, realizando las iteraciones necesarias para generar un análisis de los datos suministrados. Al programa se le introduce un conjunto de datos fijos de entrada al sistema: humedad, rugosidad, densidad, presión, altura de la estación, de acuerdo al sitio seleccionado. Estos datos se deben tomar de la literatura que el usuario determina especificando la zona en la que está ubicada la estación. Una vez insertados los datos, el programa realiza el cálculo, presentando una interfaz gráfica seleccionando la estación a analizar y se ejecuta el algoritmo.

Por último se desarrolló el algoritmo, para el análisis de la rosa de vientos, visto en la [figura 3](#), en la que el algoritmo tiene las direcciones del flujo del viento ya establecidas. Una vez el programa evalúa la información suministrada, se muestran las direcciones que posee el flujo de viento.



Fig. 3. Algoritmo de cálculo empleado para la Rosa de Vientos

Caracterización de los datos de velocidad de viento para las estaciones Puerto Bolívar y Usme

La base de datos fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con un registro de datos históricos desde el año 2012 hasta el año 2013; los datos que se registraron fueron de velocidad y dirección cada 60 minutos.

En el análisis inicial se determinó, el promedio de cada año de registro, caracterizando los datos como se muestran en la [tabla 1](#), almacenando los promedios por día. Los registros se encuentran en un periodo de tiempo de 2 años (2012 y 2013), para cada estación. Los datos que se muestran en las [tabla 1](#), se encuentran divididos desde el mes Enero hasta el mes de Diciembre, agrupados y caracterizados por año registrado, para su posterior análisis matemático y estadístico, visualizando el comportamiento del viento en cada zona.

Tabla 1. Características de los datos **registrados** para las estaciones meteorológicas Puerto Bolívar y Usme

Estación	Fecha inicial	Fecha final	Datos en calma	Datos Activos	Total de Datos	Velocidad Promedio del viento (m/s)	Frecuencia datos en Calma %	Frecuencia de datos Activos %
Estación Puerto Bolívar								
2012	01/01/2012	31/12/2012	9	357	366	5,04	2	98
2013	01/01/2013	31/12/2013	3	362	365	5,63	1	99
Estación de Usme								
2012	01/01/2012	31/12/2012	0	366	366	5,77	0	100
2013	01/01/2013	31/12/2013	3	363	365	5,77	1	99

Resultados

Los datos en calma en las mediciones realizadas ([ver tabla 1](#)) para la estación de Puerto Bolívar, se registraron para el año 2012, 9 datos equivalentes al 2,5 % del total de los datos en calma, para el año 2013 se registraron 3 datos, que equivalen al 0,8 %. para la estación de Usme en el año 2012 no se registraron datos en calma, siendo constantes las velocidades durante el año a diferencia del año 2013, que si se registraron 3 datos, equivalentes al 0,54 %. Las velocidades medias-bajas, son valores entre 1,5 m/s y 3,0 m/s (incluye la calma, la ventolina y brisa ligera, según la escala de Beaufort que expresa la fuerza del viento).

Resultados del algoritmo aplicado en las dos estaciones

Al programa se le deben suministrar los datos de entrada fijos, [tabla 2](#), para cada estación respectivamente.

Tabla 2. Datos de ingreso al sistema para la estación de Puerto Bolívar y Usme

Datos de entrada al sistema	Estación	
	Puerto Bolívar	Usme
Humedad (%)	80	59,8
Altura de estación a nivel de piso (m)	10	10
Altura de estación sobre el nivel del mar (m)	23	3086
Presión	1012,4	753,4
Rugosidad (Zo)	0,0002	0,05
Densidad del aire	1,2	0,9
Temperatura (°C)	37	12

Una vez definidos los datos de entrada al sistema se ejecuta el algoritmo obteniendo una interfaz gráfica en la que se observa el análisis estadístico inferencial, la gráfica del perfil del viento a varias alturas, la gráfica de perfil de potencia, las gráficas relacionadas con cada uno de los matemáticos de proyección, por ultimo muestra una [tabla](#) de los parámetros de cada modelo y la densidad de potencia eólica, visto el resultado en la [figura 4](#) para la Estación de Puerto Bolívar, ídem para Usme. Con este resultado se puede determinar el comportamiento del viento para cada estación.

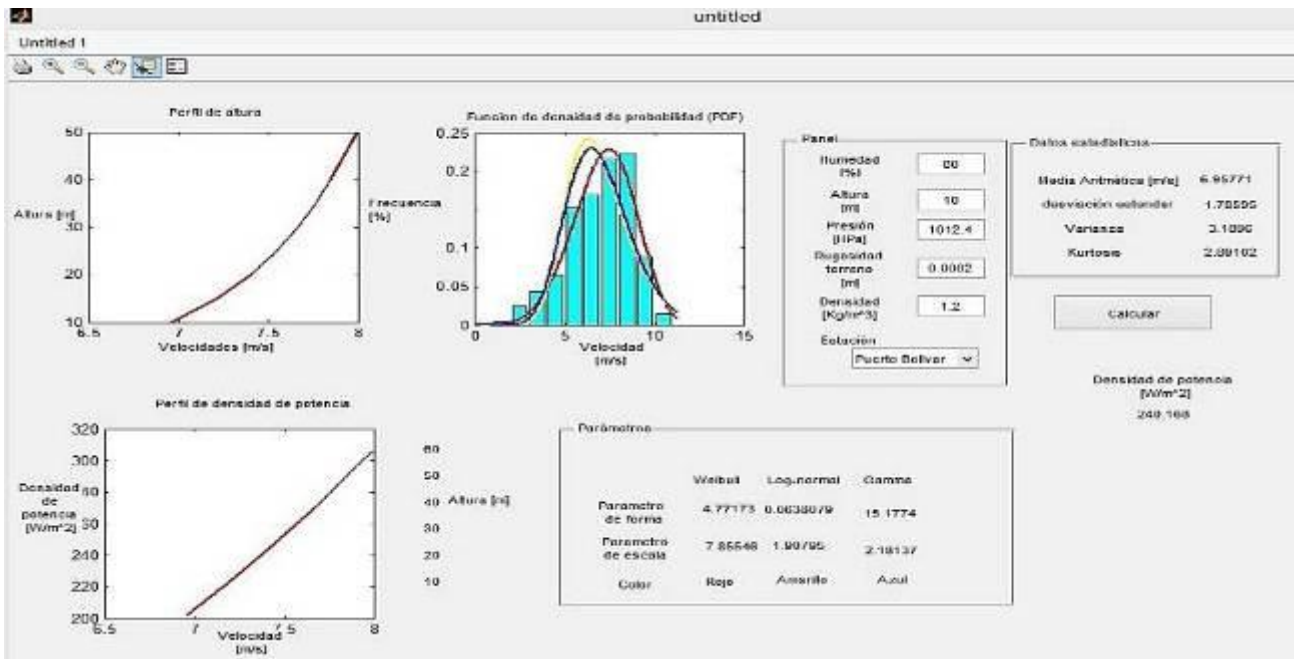


Fig. 4. Interfaz gráfica de resultante para la Estación de Puerto Bolívar

Análisis estadístico de los resultados obtenidos por el Guide para las estaciones Puerto Bolívar y Usme

El registro de datos para las estaciones de Puerto Bolivar y Usme se pueden observar en la [tabla 3](#).

Tabla 3. Análisis estadístico inferencial para las estaciones Puerto Bolívar y Usme

Datos	2012	2013	Datos registrados
Estación Puerto Bolívar			
Velocidad Máxima	11,30	10,0	11,30
Velocidad Mínima	1,75	1,79	1,75
Velocidad promedio \bar{x} (m/s)	6,81	7,09	6,95
Desviación estándar σ	2,02	1,49	1,78
Varianza	4,09	2,24	3,18
Kurtosis	2,53	3,03	2,89
Estación de Usme			
Velocidad Máxima	8,50	6,30	8,50
Velocidad Mínima	0,00	1,30	0,00
Velocidad promedio \bar{x} (m/s)	4,18	2,15	3,16
Desviación estándar σ	1,37	1,48	1,75
Varianza	1,88	2,20	3,08
Kurtosis	3,21	2,24	2,76

En la [tabla 4](#), se visualizan los parámetros de forma y escala para cada uno de los modelos de proyección, Weibull, Log-Normal y Gamma, las cuales se pueden diferenciar en la gráfica de la interfaz por sus diferentes tonalidades según el modelo programado, [figura 5](#).

Tabla 4. Parámetros de forma y escala de las funciones de distribución probabilística (PDF) para las estaciones de Puerto Bolívar y Usme

	Parámetros	Puerto Bolívar	Usme
Weibull (Rojo)	K	4,77	2,33
	C	7,85	3,90
Log-Normal (Amarillo)	σ	0,06	0,26
	μ	1,90	1,01
Gamma (Azul)	α	15,17	3,25
	β	2,18	1,02

Una vez realizada la modelación matemática de la proyección de los datos de la velocidad, el *Guide* muestra la rosa de viento, [figura 5](#), definiendo la dirección del viento predominante para cada estación analizada.

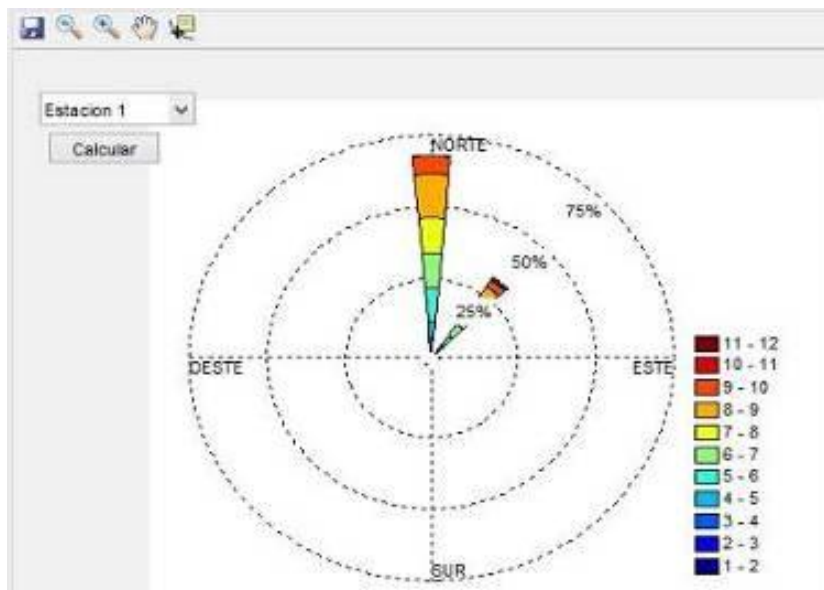


Fig. 5. a. Interfaz gráfica de la Rosa de vientos para Puerto Bolívar ídem para Usme

Discusión

En esta investigación se puede observar que el algoritmo empleado para la presentación de la interfaz grafica muestra los perfiles del viento y las direcciones; así como la densidad de potencia por cada metro cuadrado de espacio. Los perfiles de viento especifican la altura inicial y posee un rango de proyección de hasta 50 metros de altura, teniendo un alto método predictivo que no solo se enfoca en las características del terreno sino también en el periodo de pronósticos de proyección.

Este método puede ser beneficioso para la visibilizarían general de la zona de estudio ya que puede proveer las posibles estrategias para la oferta de mercado de electricidad, permitiendo una mejor planificación y aceleración de nuevos sistemas de generación de energía útil.

Análisis estadístico del Viento

El análisis estadístico que se realizó para los datos velocidades y direcciones del viento, en las estaciones meteorológicas suministradas por el IDEAM, se establecen inicialmente las características de cada una, asumiendo las variaciones existentes en cuanto a los datos en calma, puesto que se observa que no superan el 2 % en cada estación visto en la [tabla 1](#), esto demuestra que los valores de las velocidades medias-bajas, registradas entre 1,5 m/s y 3,0, son mínimas,

La variabilidad estacional de la velocidad del viento se diferencia en cada estación, dadas las condiciones del terreno, La estación de Puerto Bolívar, presenta un aumento notable en la velocidad, debido a su ubicación sobre la costa, en consecuencia a ello, es afectada por enfriamiento del continente, ocasionando una mayor circulación del viento con relación a otras zonas, Para la estación de Usme el flujo del viento es menor, debido a su ubicación, son predominantes los vientos alisios del Sur-Este, dado a que siguen el ciclo estacional de la Zona Intertropical,

En la [tabla 3](#), se observa un análisis estadístico inferencial para cada estación, donde los valores de la velocidad media, es de 6,95 m/s para Puerto Bolívar, y de 4,86 m/s para Usme, Una vez el programa ejecuta el análisis estadístico, con los datos suministrados en la hoja de cálculo y los valores de entrada al sistema suministrados por el usuario, se inicia una iteración constante del algoritmo de cálculo diseñado, generando el análisis del comportamiento del viento.

Análisis de las funciones de densidad de probabilidad (PDF) programadas

La interfaz que se observa en la [figura 4](#), determinan los parámetros de las distribuciones estimadas, presentadas en la [tabla 4](#), para las dos estaciones, con grandes diferencias en la medida estimada, dadas las condiciones de la zona,

Para Puerto Bolívar, la distribución de Weibull ($k = 4,77$; $C = 7,85$), establece la distribución binomial, con base en las propiedades estadísticas mixtas; la distribución de Log-normal define los dos parámetros ($\alpha = 0,06$; $\beta = 1,9$), con una diferencia en la distribución, ya que encaja los histogramas de los datos de la velocidad del viento, dada la distribución logarítmica, empleada en el algoritmo de cálculo, Por último se observa la distribución Gamma, donde sus dos parámetros ($\alpha = 15,17$; $\beta = 2,18$), corresponde con el mejor

ajuste de conjunto de datos, ya que esta variable aleatoria discreta, hace una descripción de la superficie, siendo esta un punto de comparación entre los datos reales y los datos previstos.

De igual forma se realizó para Usme, donde se obtuvo la distribución de Weibull ($k = 3,54$; $C = 4,17$), el Log-normal ($\alpha = 0,10$; $\beta = 1,38$) seguido por Gamma ($\alpha = 9,30$; $\beta = 2,22$).

La velocidad del viento más alta se obtuvo para puerto Bolívar, presentando una media de 6,95 m/s, que si se compara con la media de la estación de Usme de 4,86 m/s, se puede analizar que el sitio adecuado para el aprovechamiento del viento se encuentra en el Norte del Caribe, puesto que los vientos se encuentra sobre este rango durante gran parte del día.

La densidad de potencia eólica generada, revelan las características de cada sitio, siendo estas proporcionales al cubo de la velocidad del viento, y su potencia eólica confirma el orden de selección, ya que los valores obtenidos para Puerto Bolívar es de 240,16 W/m² y para Usme es de 27,81 W/m², esta variación de la densidad de potencia con respecto a la altura sobre la superficie de la tierra, reiteran que el aprovechamiento de la estación de Puerto Bolívar, es mejor puesto que las condiciones están dadas, gracias a su comportamiento eólico. Dentro del desarrollo de la investigación se observaron algunas limitaciones enfocadas a la recopilación de los datos; teniendo en cuenta que los sitios seleccionados no poseen la información de la velocidad y dirección del viento disponible al usuario.

Conclusiones

Se determinó la densidad de potencia para las dos estaciones, Puerto Bolívar con 240,16 W/m² y Usme con 27,81 W/m² y su comportamiento a hasta los 50 metros de altura. La estación de Puerto Bolívar tiene una mejor distribución de los datos, su velocidad es constante en un rango de 5 a 8 m/s durante gran parte del día. Esto demuestra que es sitio que permite el aprovechamiento adecuado del recurso eólico.

Los resultados de la interfaz gráfica para la rosa de vientos, muestra claramente las direcciones predominantes del viento en cada estación. Para puerto Bolívar las direcciones del viento provienen del Norte con un rango de 19 a 10m/s en un 75 % y el Noreste entre 10 y 12 m/s en un 25 %, La estación de Usme presenta los vientos predominantes del Sureste en un rango de 6 a 8 m/s con un 35 %, hacia el Sur-Sureste en un rango de 8 a 9 m/s con un 30 % y en direcciones aleatorias que se encuentran entre el Este y el Sur con velocidades entre 0 y 4 m/s correspondientes al 35 %. Se puede concluir que la estación de Puerto Bolívar tiene un mejor comportamiento ya que sus direcciones no varían con tanta frecuencia en relación a la de Usme.

Agradecimientos

Agradecemos al Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables por permitir utilizar las instalaciones y equipos, a la Dirección de Investigación y Extensión sede Bogotá DIEB de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico para la elaboración de la investigación. Al Grupo de Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética MDL & GE y la Red Internacional para la Energización Rural y desarrollo Agroindustrial Sostenible PRIDERAS.

Referencias

1. Shamshad A, Wan Hussin W, Bawadi M, et al. Analysis of Wind Speed Variations and Estimation of Weibull Parameters for Wind Power Generation in Malaysia. Pulau Pinang, Malaysia: School of Civil Engineering, Engineering Campus; 2013. [Citado noviembre 2015]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/files/423/11960230.pdf>
2. Yao Z, Jianxue W, Xifan W. Review on probabilistic forecasting of wind power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;32:225-70.
3. Zaharim A, Razali A, Abidin R. Malaysia Fitting of statistical distributions to wind speed data in Malaysia. *European Journal of Scientific Research*. 2009;26:6-12.
4. Guevara Díaz JM. Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia. *Terra Nueva Etapa*. 2013;29:81-101.
5. Guevara DJ. Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra Nueva Etapa*. 2013;XXIX(46):81-101.
6. Lo Brano V, Orioli A, Ciulla G, et al. Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo. *Renewable Energy*. 2011;36:1026-39.
7. Bonfil S. Modeling wind speed wind power distributions in RWANDA Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011;117:925-35.
8. Junyi Z, Ergin E, Gong L. Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study. *Energy Conversion and Management*. 2010;51:1449-58.
9. Carta JA, Ramírez P, Velázquez S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis Case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13:933-55.