



Método de inverso de la potencia de la distancia para estimar la velocidad del viento

Method of inverse of the power of the distance to estimate the speed of the wind

Eduardo - Terrero Matos
Arístides A. - Legrá Lobaina
Aliet - Lamorú Reyes

Recibido: junio de 2013
Aprobado: marzo de 2014

Resumen/ Abstract

El aprovechamiento del potencial energético del viento requiere obtener suficientes y adecuadas mediciones de la velocidad y la dirección del viento. A partir de estas se modela el comportamiento de estas variables y se calculan los parámetros que caracterizan el potencial; con estos resultados se diseñan los parques eólicos seleccionando los aerogeneradores más convenientes, determinando sus ubicaciones espaciales y diseñando la infraestructura tecnológica. La presente investigación tiene como objetivo resolver uno de los problemas prácticos más comunes durante este proceso: la ausencia de suficientes datos medidos. La solución que se propone se basa en la estimación de los datos ausentes mediante el Método de Inverso de una Potencia de la Distancia, el cual es aplicado a un caso de estudio denominado Colina 4. Los resultados muestran que el método es viable para cualquier caso semejante y que los valores estimados son coherentes con los datos medidos.

Palabras clave: estimación del potencial de energía eólica, distribución de Weibull, inverso de la distancia.

The use of the wind energy potential requires obtaining sufficient and appropriate measurements of velocity and wind direction. From these measurements, the behavior of these variables is modeled and the parameters of this potential are calculated; with these results the wind farms are designed, selecting the most convenient wind turbines, determining their space locations and designing the technological infrastructure. The present research aims to solve one of the most common practical problems during this process: the absence of sufficient measured data. The solution proposed is based on the estimation of the missing data by means of the Inverse of a Power of the Distance Method, which is applied to a case of study named Colina 4. The results show that the method is viable for any similar case and that the estimated values are coherent with the measured data.

Keywords: estimated potential for wind energy, distribution of Weibull, inverse of the distance.

INTRODUCCIÓN

A modo de síntesis puede afirmarse que el potencial de energía eólica de una región puede determinarse siguiendo los siguientes pasos siguientes [1-2]:

- a. Obtención de la información primaria sobre la velocidad y dirección del viento mediante mediciones realizadas en varios puntos de prospección y a diferentes alturas

- b. Modelación matemática del comportamiento de la velocidad del viento mediante una Distribución de Weibull.
- c. Cálculo de los valores que caracterizan el potencial energético del viento en la región.

En ocasiones, por razones técnicas y fenomenológicas, durante la ejecución de la primera etapa no se obtienen mediciones para algunos intervalos de tiempo en algunos de los puntos de prospección lo cual tiene una influencia negativa en la aplicación de la modelación matemática y cálculo de las siguientes etapas lo cual, finalmente, provoca que los resultados probablemente sean incorrectos.

Por otra parte, las mediciones usualmente se realizan a ciertas alturas prefijadas y no se dispone de datos para otras alturas (inferiores, intermedias o superiores). Es obvio que sería conveniente disponer de información adecuada si se quiere evaluar el potencial energético al nivel de las alturas donde no se realizaron mediciones.

Estas son las causas que hacen necesario completar y ampliar la base de datos medida, estimando los valores de velocidad y dirección del viento en aquellos puntos y momentos donde no pudieron ser medidos [3-4].

Teniendo en cuenta lo antes expuesto el objetivo del presente trabajo es establecer una metodología de cálculo matemático que estime con suficiente precisión los valores ausentes de velocidad y dirección del viento en una base de datos que se utilizará para evaluar el potencial energético de los vientos en una región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Usualmente las mediciones de velocidad y dirección del viento en una región de interés se realizan mediante torres que portan anemómetros y veletas que se desempeñan como sensores que transmiten la información que miden a una unidad que almacena y controla el proceso (generalmente una computadora).

En el caso de estudio que se investiga en este trabajo, la región de interés se denomina Colina 4 situada, en el municipio Moa de la Provincia Holguín, Cuba. Esta elevación, según el sistema de coordenadas Lambert se sitúa entre los puntos (693500; 694000) y (223500; 224000) a una altura de 140 m. En el punto más alto de esta colina se situó una torre de medición con tres anemómetros de copa THIES de Primera Clase de procedencia alemana situados respectivamente a las alturas de 10, 30 y 50 m con respecto a la superficie del terreno. Además, se situó en su extremo superior una veleta THIES también de fabricación alemana.

Las mediciones de la velocidad y dirección del viento se procesaron estadísticamente y cada 10 minutos, durante un período de 426 días, se informó un registro que contiene los valores de velocidad media, velocidad máxima y la desviación estándar de la velocidad para cada una de las alturas señaladas así como la dirección del viento en grados sexagesimales. Se obtuvieron un total de 61344 registros.

El antecedente más conocido para estimar los valores de la velocidad del viento se basa en el uso del Coeficiente de Rugosidad n que se calcula a partir de la Longitud de Rugosidad h_r , medida en metros. Según la Asociación Danesa de la Industria Eólica [5], este coeficiente de rugosidad se aproxima mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$n = 1,69982301 + \frac{\ln(h_r)}{\ln(150)}, \text{ si } h_r \leq 0,03 \quad (1)$$

$$n = 3,91248929 + \frac{\ln(h_r)}{\ln(3,33333)}, \text{ si } h_r > 0,03 \quad (2)$$

Donde: h_r se define como la distancia sobre el nivel del suelo a la que teóricamente la velocidad del viento debería ser nula.

Mur Amada [2] explica que la velocidad a cualquier altura se puede calcular mediante la Ley Exponencial del Viento de Hellman descrita por la ecuación (3):

$$V = V_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^n \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$

Donde: V_o es la velocidad conocida a la altura h_o y V es la velocidad a la altura h .

La ecuación (4), según Mur Amada [2] también se utiliza para determinar la velocidad a cierta altura h si se conoce la velocidad V_o a otra altura h_o y se conoce h_r .

$$V = V_o \left[\frac{\ln(h) - \ln(h_r)}{\ln(h_o) - \ln(h_r)} \right] \quad (\text{m/s}) \quad (4)$$

Para aplicar estas fórmulas se suponen conocidos los valores de h_r , h_o y n lo cual no siempre es posible. En el caso de Colina 4 estos parámetros no han sido estudiados hasta la actualidad. Por otra parte, en ambos enfoques se supone que la velocidad aumenta continuamente según aumenta h y esto no siempre sucede. Las mediciones realizadas en el caso de Colina 4 muestran que esto no se cumple todo el tiempo; o sea, en ocasiones se tienen que a mayor altura hay menor velocidad que a baja altura. Esta problemática conduce a recomendar un nuevo enfoque.

Para modelar matemáticamente las mediciones registradas se tomó un sistema de coordenadas espacio-temporal de tres dimensiones. Las dimensiones consideradas son: el día (D), la hora (H) tomada cada diez minutos; y la altura (A). Entonces, cada velocidad V puede ser identificada por el punto (D;H;A;V) y cada dirección R es identificada por el punto (D;H;R) (vea la figura 1)

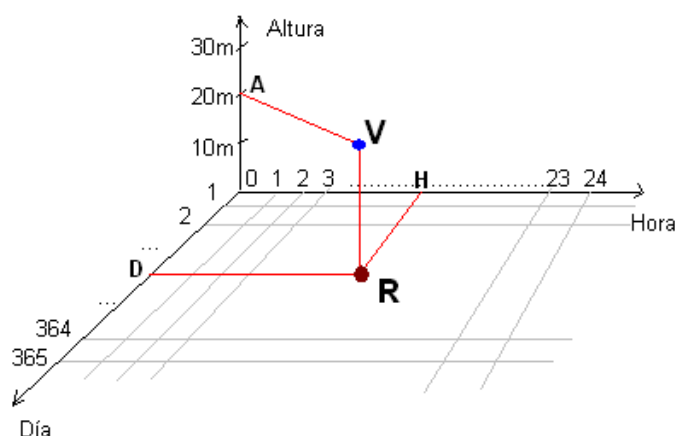


Fig. 1. Sistema de coordenadas espacio-temporal para representar la velocidad V y la dirección R .

En este trabajo se propone el Método de Inverso de una Potencia de la Distancia (MIPD) para estimar la velocidad en coordenadas (D; H; A) donde se desconozca su valor; también, para casos semejantes, se propone este método para estimar la dirección del viento en coordenadas (D; H). El MIPD, que ha sido aplicado satisfactoriamente en la modelación vectorial del viento [6], consiste en una media ponderada de los valores conocidos donde los factores de ponderación son los inversos de potencias de las distancias entre cada punto conocido y el punto donde se estima. Tiene la siguiente formulación [4-7]:

Dados k puntos $(P_i; Z_i)$ de R^{n+1} se estima el valor de Z en un punto P mediante la ecuación (5):

$$Z_{est} = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_i^w} Z_i \right)}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d_i^w} \right)} \quad (5)$$

La ecuación (5), es válida cuando el punto P (donde se estima) es diferente a todos los puntos P_i . Si para algún índice i , $P=P_i$, entonces se toma $Z_{est}=Z_i$. Nótese que d_i^w es la potencia de exponente w de la distancia euclidiana d entre el punto P_i y el punto P.

Para el caso de las velocidades se tiene que $Z=V$ y la distancia euclidiana entre dos puntos P_i y P_j se calcula mediante la ecuación (6).

$$d(P_i;P_j)=\sqrt{\alpha_D(D_i - D_j)^2 + \alpha_H(H_i - H_j)^2 + \alpha_A(A_i - A_j)^2} \quad (6)$$

Para el caso de las direcciones se tiene que $Z=Ry$ la distancia euclidiana entre dos puntos P_i y P_j se calcula mediante la ecuación (7).

$$d(P_i;P_j)=\sqrt{\alpha_D(D_i - D_j)^2 + \alpha_H(H_i - H_j)^2} \quad (7)$$

Donde α_D , α_H y α_A son factores de normalización de las escalas de las dimensiones.

Para la aplicación de estos métodos deben ejecutarse primero las siguientes tareas:

- Establecer los valores de α_D , α_H y α_A .
- Determinar cuáles datos se usarán en cada estimación particular.
- Determinar el valor más adecuado de la potencia w .

Después de varias pruebas numéricas se establece que $\alpha_D=4$; $\alpha_H=16$; y $\alpha_A=0,01$

Para encontrar un valor adecuado de w se utilizó la Prueba de Validación Cruzada [7] que consiste en estimar el valor de Z para cada punto P_i de los datos medidos pero sin usar este dato durante la estimación. Haciendo referencia a la velocidad del viento, esto quiere decir que para cada punto conocido (D_i ; H_i ; A_i) se tendrán dos valores: V_i (medido) y V_{est-i} (estimado). Según Álvarez Blanco y col. [8], el error relativo porcentual e_i puede definirse para cada punto (D_i ; H_i ; A_i) mediante la ecuación (8).

$$e_i = \left| \frac{V_{est} - V_i}{V_i} \right| \quad (8)$$

Para el caso de estudio de la presente investigación se obvia la estimación de la variable dirección debido a que no se tienen ausencias de estos valores en ninguna coordenada temporal (D ; H).

Se realizaron pruebas de validación cruzada para 30 valores (entre 0,25 y 7,5) de la potencia w y en cada caso se caracterizó la media aritmética MA y la desviación estándar DE de los errores relativos porcentuales de las variables Velocidad Promedio (VP) y Desviación Estándar (DE) de la velocidad para las alturas $A=50$ m; $A=30$ m; y $A=10$ m. En la tabla 1, se muestran estos resultados y de ellos se deduce inmediatamente que debe tomarse $w=7,25$ ya que es la potencia donde se comenzaron a obtener todas las medias aritmética de los errores porcentuales menores de un 0,1 (10%). Esta última cota se asume por ser: menor que el error de 15% usual en estos casos [1]; y, además, ser aproximadamente la mitad de los coeficientes de variación que tiene la velocidad del viento en las alturas medidas, tal como se observa en la tabla 1.

Para determinar el número de datos utilizados en cada estimación se consideraron los siguientes criterios producto de un análisis heurístico del comportamiento del clima en la región así como la relación que se espera entre el comportamiento del tiempo en diferentes horarios del día y en diferentes épocas del año.

- Usar un día antes y un día después del punto que se estima
- Usar un intervalo de tiempo antes y uno después del punto que se estima
- Usar un intervalo de altura antes y uno después del punto que se estima.

Este conjunto de puntos conforman un ortoedro de inclusión. El próximo paso fue aplicar el MIPD a los datos para estimar los valores faltantes. Para sistematizar el procedimiento se distinguieron los siguientes casos:

Caso 1: El tiempo está entre la primera y la última medición y la altura es intermedia (vea la figura 2(a). El ortoedro está totalmente definido.

Caso 2: El intervalo de tiempo está entre la primera y la última medición; y la altura es de 10 m ó 50 m (vea la figura 2(b). El ortoedro está definido incluyendo puntos inferiores (o superiores).

Caso 3: El intervalo de tiempo está en la primera o en la última medición; y la altura es intermedia (vea la figura 2(c). El ortoedro está definido incluyendo puntos temporales más alejados.

Caso 4: El intervalo de tiempo está en la primera ó en la última medición; y la altura es de 10 m, ó a 50 m (vea la figura 2(d). El ortoedro puede incluir puntos temporales y espaciales más alejados

Tabla 1. Medias aritmética MA (m/s) y desviaciones estándar DE (m/s) de los errores relativo de la velocidad promedio VP en las alturas de medición cuando se aplica la técnica de validación cruzada.

| w | MA VP - 50 | DE VP - 50 | MA VP - 30 | DE VP -30 | MAVP - 10 | DE VP - 10 |
|------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| 0,25 | 0,32153947 | 0,63454941 | 0,30596094 | 0,56118979 | 0,28331242 | 0,49125249 |
| 0,5 | 0,31068956 | 0,61362472 | 0,29583942 | 0,54351776 | 0,27427676 | 0,47705353 |
| 0,75 | 0,29931052 | 0,59171878 | 0,28522908 | 0,5250664 | 0,26480798 | 0,46191448 |
| 1 | 0,28749112 | 0,56896726 | 0,27421692 | 0,50591424 | 0,25498543 | 0,44607883 |
| 1,25 | 0,27532266 | 0,54553279 | 0,26288994 | 0,4861867 | 0,24489201 | 0,42973456 |
| 1,5 | 0,26290126 | 0,52159817 | 0,25133685 | 0,46603693 | 0,23462111 | 0,41303708 |
| 1,75 | 0,25033363 | 0,49736066 | 0,23966589 | 0,44562828 | 0,22426993 | 0,39613828 |
| 2 | 0,23773725 | 0,47302573 | 0,22799506 | 0,42513225 | 0,21392459 | 0,37920117 |
| 2,25 | 0,22522866 | 0,44880492 | 0,21642618 | 0,40473448 | 0,20369029 | 0,36238004 |
| 2,5 | 0,21292281 | 0,42490742 | 0,20505406 | 0,3846217 | 0,19367039 | 0,34582642 |
| 2,75 | 0,20092296 | 0,40153652 | 0,19399392 | 0,3649593 | 0,1839579 | 0,32968722 |
| 3 | 0,18934084 | 0,37887176 | 0,18333921 | 0,34590675 | 0,17464381 | 0,31409354 |
| 3,25 | 0,17826861 | 0,35707632 | 0,17317555 | 0,32760407 | 0,16579744 | 0,29916618 |
| 3,5 | 0,16778572 | 0,33628855 | 0,16358201 | 0,31016658 | 0,15748224 | 0,28500256 |
| 3,75 | 0,15795209 | 0,31662205 | 0,15461707 | 0,2936891 | 0,14975598 | 0,27167385 |
| 4 | 0,1488036 | 0,29816621 | 0,14630892 | 0,27824952 | 0,14264651 | 0,25923711 |
| 4,25 | 0,14037827 | 0,28097326 | 0,13867114 | 0,26390041 | 0,13616979 | 0,24772545 |
| 4,5 | 0,13268533 | 0,26507495 | 0,13171449 | 0,25066412 | 0,13032515 | 0,23715222 |
| 4,75 | 0,12571145 | 0,25048214 | 0,1254423 | 0,23853762 | 0,12510676 | 0,22750733 |
| 5 | 0,1194457 | 0,23717565 | 0,11983292 | 0,22750495 | 0,12048975 | 0,21876841 |
| 5,25 | 0,11385867 | 0,22512076 | 0,11485869 | 0,21753116 | 0,11644127 | 0,21089883 |
| 5,5 | 0,10891915 | 0,21426322 | 0,11048659 | 0,20856613 | 0,11292485 | 0,20384959 |
| 5,75 | 0,10458579 | 0,20453794 | 0,10668039 | 0,20054783 | 0,10989298 | 0,19756781 |
| 6 | 0,1008223 | 0,19586572 | 0,10339287 | 0,1934107 | 0,10729851 | 0,19199445 |
| 6,25 | 0,09757717 | 0,18816778 | 0,10056494 | 0,18709018 | 0,10511031 | 0,18705915 |
| 6,5 | 0,09479442 | 0,1813643 | 0,09816215 | 0,1815067 | 0,10326453 | 0,18271047 |
| 6,75 | 0,09242227 | 0,17537326 | 0,09612557 | 0,17659497 | 0,10171393 | 0,17889081 |
| 7 | 0,09042171 | 0,17010868 | 0,09441315 | 0,1722842 | 0,10042306 | 0,17554067 |
| 7,25 | 0,08873666 | 0,16549848 | 0,09298791 | 0,16850602 | 0,09935075 | 0,17260966 |
| 7,5 | 0,08731912 | 0,16147293 | 0,09180088 | 0,16520518 | 0,09846927 | 0,17004627 |

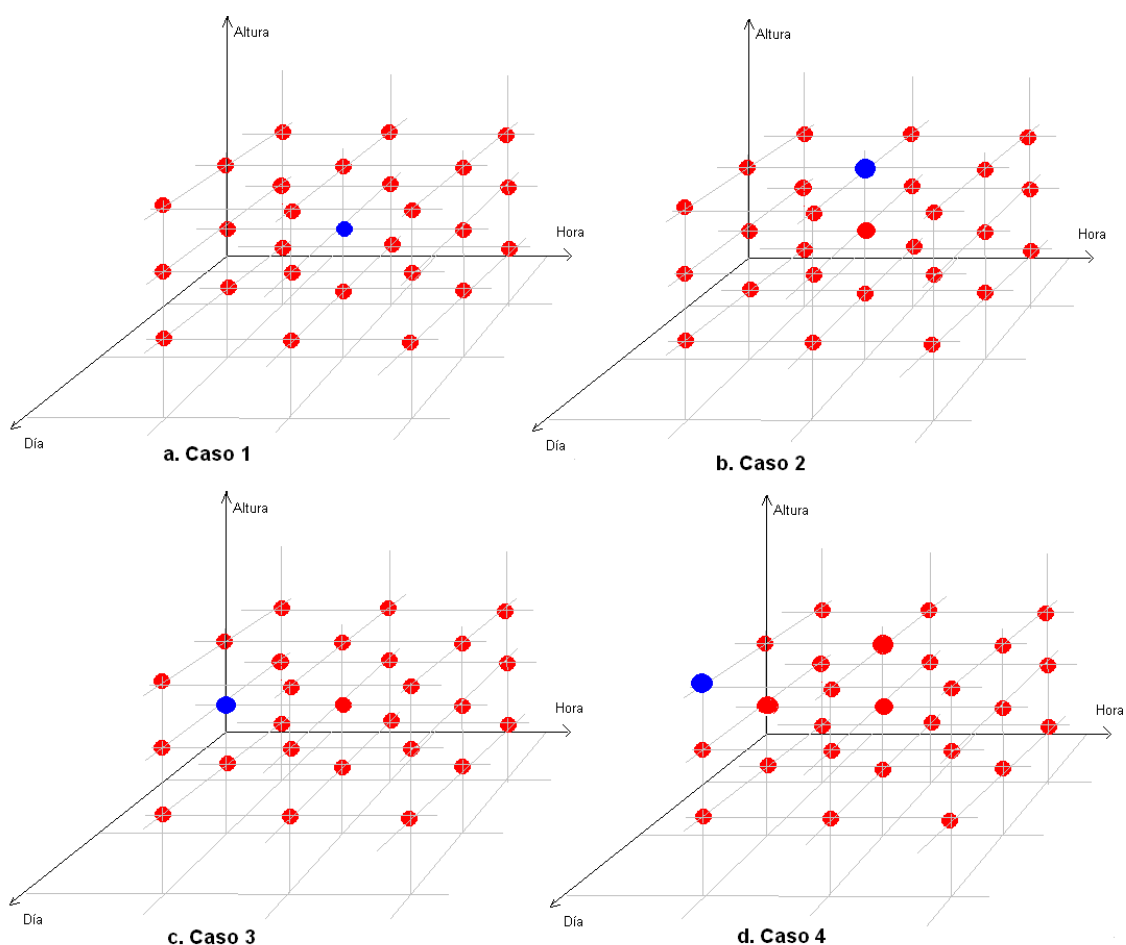


Fig. 2. Casos de relación entre el punto donde falta un valor y los puntos donde se tienen valores medidos.

El algoritmo que se propone para estimar los datos ausentes contempla estos cuatro casos con el fin de garantizar un nivel adecuado de información en cada estimación. Cuando falten varios datos consecutivos se aplicará un algoritmo que aumenta el tamaño del ortoedro de inclusión.

Además para la estimación de los valores desconocidos superiores al nivel superior de 50 m se asumen solo datos correspondientes a esta última altura y se aplicó una corrección a los resultados según la Ley de Hellman tomando $n=0,2465$. Este último valor es la moda de todos los posibles resultados de calcular n para los datos disponibles.

Dados los datos de la velocidad del viento V en cada punto espacio-temporal (D; H; A), según Alencar do Nascimento Feitosa y col. [9], se puede determinar la distribución de frecuencia de esta variable y modelarla mediante la función de densidad de una Distribución de Weibull dada por la ecuación (9), que expresa la probabilidad de que la velocidad del viento tenga el valor V :

$$f(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K} \quad (9)$$

El procedimiento para obtener los valores de K (factor de forma, a dimensional) y C (factor de escala, m/s) se basa en los siguientes pasos [9-10]:

- a. Se define la función de distribución (acumulativa) de Weibull mediante la ecuación (10).

$$F(V) = 1 - e^{-\left[\left(\frac{V}{C}\right)^K\right]} \quad (10)$$

- b. Tomando el logaritmo neperiano en ambos miembros de la ecuación (10) y realizando algunas transformaciones se obtiene la ecuación (11).

$$\ln[-\ln(1 - F(V))] = K \ln(V) - K \ln(C) \quad (11)$$

- c. Asumiendo que $Y = \ln[-\ln(1 - F(V))]$; $X = \ln(V)$; $A = K$; y $B = -K \ln(C)$, entonces se ajusta por el Método de los Mínimos Cuadrados [10] el modelo $Y = A X + B$ de manera que se obtienen los valores: $K = A$ y $C = e^{-B/K}$.

Es importante conocer el coeficiente de correlación r [11], que informa sobre la calidad del ajuste.

A partir de la Distribución de Weibull deben determinarse los parámetros del modelo que caracterizan la potencia y la energía del viento [9] mediante las ecuaciones (12), (13), (14), (15), (16), (17) y (18).

Velocidad media del viento:

$$V_m = C q_1 \text{ (m/s)} \quad (12)$$

Donde: $q_1 = \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)$; $\Gamma(x)$ es la función Gamma

Desviación estándar del viento:

$$d_m = C(q_2 - q_1^2) \text{ (m/s)} \quad (13)$$

Donde: $q_2 = \Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right)$

Intensidad de la turbulencia del viento (Coeficiente de variación):

$$I_m = 100 \left(\frac{d_m}{V_m} \right) \text{ (Porcentual)} \quad (14)$$

Moda de la velocidad del viento:

$$m_m = C q_0^{\frac{1}{K}} \text{ (m/s)} \quad (15)$$

Donde: $q_0 = \Gamma\left(1 - \frac{1}{K}\right)$

Velocidad donde se obtiene la máxima potencia del viento:

$$V_a = C q_2^{\frac{1}{K}} \text{ (m/s)} \quad (16)$$

Densidad de potencia:

$$P_1 = \frac{\rho C^3 q_3}{2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (17)$$

Donde: $q_3 = \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right)$ y ρ es la densidad del aire.

Energía por m² en un intervalo de tiempo

$$E = P_1 t \text{ (Ws/m}^2\text{)} \quad (18)$$

Donde: t (s) es el tiempo considerado.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Al estimar los valores faltantes de la velocidad del viento en las alturas: A=50 m; A=30 m; y A=10 m; así como todos los valores para las alturas A=60 m; A=40 m; y A=20 m, se cumplió la tarea que garantiza la información primaria para evaluar el potencial eólico en la región Colina 4 de Moa. Los resultados estadísticos básicos y los resultados del cálculo de los parámetros energéticos se muestran en la tabla 2.

Mediante las distribuciones de Weibull que se muestran en las figuras 3 y 4, se modela el comportamiento de la velocidad del viento a diferentes alturas.

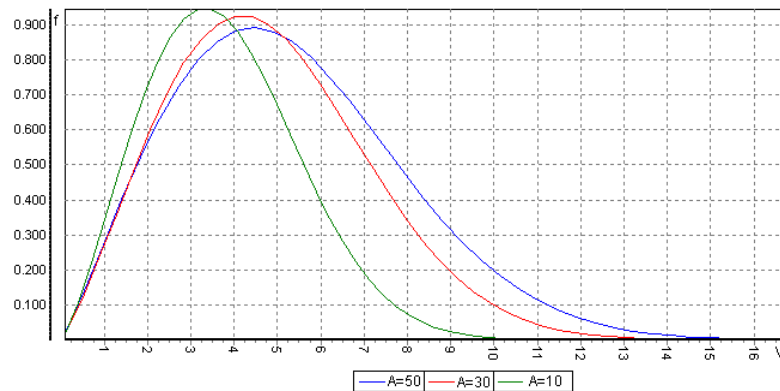


Fig. 3. Distribuciones de Weibull en las alturas: A=50 m; A=30 m; y A=10 m.

En el caso de la figura 3, que se refiere a los datos medidos y a su completamiento, nótese que la velocidad aumenta con la altura.

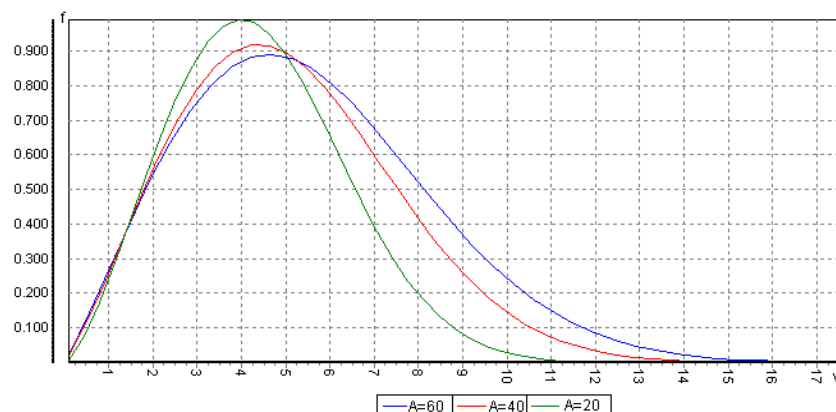


Fig. 4. Distribuciones de Weibull en las alturas: A=60 m; A=40 m; y A=20 m.

En el caso de la figura 4, también es posible observar que según aumenta la altura, la velocidad es mayor. Esto también es cierto si se comparan con las curvas de las figuras 3 y 4.

En la tabla 2, se muestran las velocidades mínimas V_{\min} y máxima V_{\max} así como los parámetros obtenidos relacionados con las distribuciones de Weibull y la energía anual. Para el cálculo se

asumió la densidad ρ del aire, considerando una temperatura de 25°C, para cada una de las alturas contempladas. Además, se pueden considerar los siguientes elementos particulares:

- Las velocidades y las intensidades de turbulencia aumentan con la altura. Esta última está entre 10% y 40% que son los valores aceptados como usuales [1].
- Los valores generales calculados de P_1 y E constituyen elementos para considerar esta como una región promisoría para la explotación de su potencial energético e indican la conveniencia de realizar cálculos de mayor profundidad.

| Altura (m) | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| V_{\min} (m/s) | 0,104597 | 0,100000 | 0,305921 | 0,96053 | 0,274342 | 0,252632 |
| V_{\max} (m/s) | 17,010734 | 16,263158 | 15,132237 | 14,411842 | 12,826974 | 11,242105 |
| K | 2,112640 | 2,112490 | 2,209059 | 2,230134 | 2,438741 | 2,295634 |
| C | 6,271707 | 5,997314 | 5,754688 | 5,444782 | 4,963559 | 4,253367 |
| r | 0,996819 | 0,996797 | 0,997876 | 0,998342 | 0,994763 | 0,997799 |
| V_m (m/s) | 5,554412 | 5,311401 | 5,096640 | 4,822171 | 4,401485 | 3,767632 |
| d_m (m/s) | 1,226367 | 1,172712 | 1,040759 | 0,965872 | 0,747049 | 0,711156 |
| I_m (%) | 22,079142 | 22,079142 | 20,420491 | 20,029817 | 16,972654 | 18,875408 |
| m_m (m/s) | 8,029338 | 7,678412 | 7,167300 | 6,743684 | 5,881691 | 5,185903 |
| V_a (m/s) | 6,211658 | 5,939888 | 5,663233 | 5,350441 | 4,832552 | 4,162891 |
| ρ (kg/m ³) | 1.157 | 1.1583 | 1.1596 | 1.1609 | 1.1622 | 1.1635 |
| P_1 (W/m ²) | 179.826760 | 157.252690 | 133.727870 | 112.317480 | 79.702261 | 52.415721 |
| E (kWh/m ²) | 4.315842 | 3.774065 | 3.209469 | 2.695620 | 1.912854 | 1.257977 |

Los resultados de la tabla 2, indican que el MIPD genera información coherente con los datos medidos y confirman su eficacia.

La rosa de los vientos [9], correspondiente al caso de estudio se muestra en la figura 5. En ella puede observarse que el viento tiene un 54,18% de las mediciones en las direcciones sexagesimales [45°;105°] por lo que pueden considerarse que sean estas las direcciones a elegir cuando se diseñe la ubicación de un aerogenerador en esa posición geográfica.

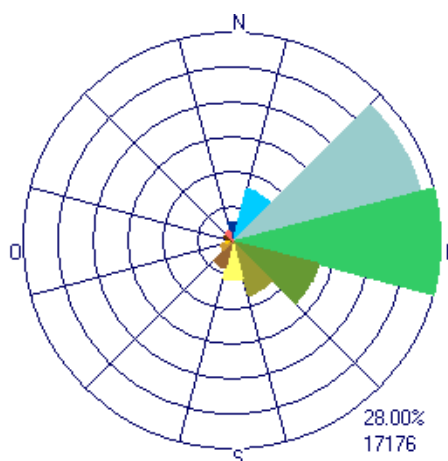


Fig. 5. Rosa de los vientos de la región Colina 4 de Moa. El 28% de las mediciones (17176 mediciones) indican las direcciones [75°; 105°].

AGRADECIMIENTO

Al Lic. Rolando Soltura Morales, Especialista Principal de la Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad (INEL), por su invaluable apoyo en el acceso a los datos usados en este trabajo así como por sus valoraciones y sugerencias metodológicas.

CONCLUSIONES

Desde un punto de vista metodológico queda establecido que el Método de Inverso de una Potencia de la Distancia es viable para resolver el problema de estimar mediciones faltantes de velocidad del viento en ciertas horas, días y alturas. La aplicación de este método se ha realizado mediante un algoritmo que tiene en cuenta las particularidades del comportamiento del viento en el tiempo y en el espacio.

El algoritmo se implementó en una aplicación informática que permitió su aplicación a un caso de estudio denominado Colina 4 donde se ajustaron previamente los parámetros de cálculo: potencia w , coeficiente de rugosidad n , el ortoedro de inclusión y los ponderadores α_D , α_H y α_A . A partir del análisis de los valores estimados, se concluye que estos son coherentes con los datos medidos.

Integrando los valores medidos y los valores estimados se calcularon los parámetros que describen el potencial energético en esa región que constituye la base para la selección y configuración de los mejores aerogeneradores que exploten este potencial.

REFERENCIAS

- [1]. MORENO FIGUEREDO, C., *et al.*, "Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica". Grupo de trabajo para el impulso de la energía eólica. La Habana: Editorial CubaSolar, 2007, p. 56, ISBN: 978-959-7113-34-8.
- [2]. MUR AMADA, J., "Curso de energía eólica". Máster europeo en energías renovables y eficiencia energética. [en línea], Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, [Consultado: 19 de mayo de 2012], Disponible en: www.windygrid.org/manualEolico.pdf.
- [3]. GNANA SHEELA, K.; DEEPA, S., "An Intelligent Computing Model for Wind Speed Prediction in Renewable Energy Systems". *Procedia Engineering*, 2012, n.30, p. 380-385.
- [4]. WANG, X., "Are view of Wind Power Forecasting Models". *Energy Procedia*, 2011. n.12, p. 770-778.
- [5]. ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. "Manual de Referencia, Primera Parte: Conceptos sobre la energía eólica". [en línea], Dinamarca, 2000, [Consultado: 11 de febrero de 2013], Disponible en: <http://www.windpower.org/es/tour/wres/shear.htm>.
- [6]. GONZÁLEZ FERREIRO, D.; BOSQUE SENDRA, J., "Generación de un mapa de vientos en un SIG". *Boletín de la A.G.E.*, [en línea], España, 2008, n.47, p. 51-77, [Consultado: 12 de enero de 2013], Disponible en: <http://www.boletinage.com/>, ISSN 0212-9426.
- [7]. GARCÍA GUERRA, P.A., "Geoestadística Operacional". Brasilia, República Federativa de Brasil: Departamento Nacional de Producción Mineral, Ministerio de Minas y Energía, 1988, p. 20-21.

[8]. ÁLVAREZ BLANCO, M.; *et al.*, "Matemática Numérica". La Habana: Editorial Félix Varela, 1998, p. 6, 277.

[9]. ALENCAR DO NASCIMENTO FEITOSA, E.; *et al.*, "Panorama do potencial eólico no Brasil". Projeto BRA/00/029, Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2002, p. 42-52.

[10]. FERNÁNDEZ DÍEZ, P., "Energía Eólica". [en línea], España: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, p. 1-19, [Consultado: 20 de Noviembre del 2012]. Disponible en: <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/index.html>, ISBN: 84-8102-019-2.

[11]. MILLER, I.R.; *et al.*, "Probabilidades y Estadísticas para Ingenieros". Ciudad Habana: Editorial Félix Varela, 2005, vol.I-II, p. 163, 326-365.

AUTORES

Eduardo Terrero Matos

Ingeniero Mecánico, Profesor Auxiliar, Máster en Ciencias Geológicas, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM), Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Las Coloradas, Holguín, Cuba.

e-mail: aeterrero@ismm.edu.cu.

Arístides Alejandro Legrá Lobaina

Licenciado en Educación Especialidad Matemáticas, Profesor Auxiliar, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM), Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Las Coloradas, Holguín, Cuba.

e-mail: alegra@ismm.edu.cu.

Alíet Lamorú Reyes

Licenciado en Ciencia de la Computación, Instructor, Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM), Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Las Coloradas, Holguín, Cuba.

e-mail: alamoru@ismm.edu.cu.