

**Título:** ¿Cómo modelar 3D el potencial eolo-energético en una región promisoría?

**Autores:**

Ms.C. Eduardo Terrero Matos

e-mail: [eterrero@ismm.edu.cu](mailto:eterrero@ismm.edu.cu)

Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa, ISMMM

Dr.C. Arístides Alejandro Legrá Lobaina

e-mail: [alegra@ismm.edu.cu](mailto:alegra@ismm.edu.cu)

Profesor del Departamento de Matemáticas, ISMMM

Ms.C. Rolando Cobas Abad

Profesor del Departamento de Física, ISMMM

**Resumen**

En el presente trabajo se propone un enfoque viable y robusto para modelar 3D el potencial eolo-energético de una región promisoría, donde se ha realizado un muestreo previo que constituyen datos experimentales; dando lugar a una propuesta que plantea, obtener los parámetros de la distribución de Weibull para los  $n$  puntos de muestreo y modelar el comportamiento de estos parámetros mediante formulaciones del tipo estimador puntual lineal generalizado para la obtención de modelo de malla  $(A,U,\Theta)$

**Palabra clave:**

**Modelo de malla  $(A,U,\Theta)$ , potencial eolo-energético, estimador puntual lineal generalizado, distribución de Weibull.**

**Summary**

Presently work intends a viable and robust focus to model 3D the eolo-energy potential of a promissory region, where he/she has been carried out a previous sampling that you/they constitute experimental data; giving place to a proposal that it outlines, to obtain the parameters of the distribution of Weibull for  $n$  sampling points and to model the behavior of these parameters by means of formulations of the type lineal widespread punctual estimador for mesh model's obtaining  $(A,U,\Theta)$ .

Key word:

I model of mesh  $(A,U,\Theta)$ , eolo-energy potential, lineal widespread punctual estimador, distribution of Weibull.

## Introducción

El procedimiento de diseñar un parque eólico que permita aprovechar la energía del viento, convirtiéndola en energía eléctrica mediante aerogeneradores, debe considerar diversos factores ambientales y tecnológicos entre los que está la cuantificación del potencial energético del viento en el territorio o región que se considere promisorio. Anon. (2000).: "Conceptos sobre la energía eólica".

Entre otros un modelo que permite identificar los puntos espaciales donde los aerogeneradores convierten eficaz y eficientemente la energía eólica en energía eléctrica es aquel que está definido por un conjunto de  $m$  puntos  $(P_i; M_i)$  donde  $P_i = (X_i; Y_i; Z_i; R_i)$  representa las coordenadas espaciales del punto  $(X_i; Y_i; Z_i)$  y  $R_i$  es la rugosidad de la superficie del terreno en el punto de coordenadas  $(X_i; Y_i)$ .  $M_i$  representa el modelo en  $P_i$ .

El modelo  $M_i$  puede ser definido por una Distribución de Weibull cuya fórmula general es: FEITOSA A. E. et al. "Panorama do potencial eólico no Brasil, Projeto BRA/00/029.

$$P(v) = \left(\frac{K}{C}\right) \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K}$$

Donde:

- $P(v)$  es la probabilidad estadística de que ocurra una velocidad  $v$
- $K$  es el denominado factor de forma (adimensional)
- $C$  es el denominado factor de escala (m/s)

A partir de la Distribución de Weibull se determinan los parámetros del modelo que caracterizan la potencia y la energía del viento mediante las ecuaciones siguientes: FEITOSA A. E. et al. "Panorama do potencial eólico no Brasil, Projeto BRA/00/029.

Velocidad media del viento:

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

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

Desviación estándar del viento:

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

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

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

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

Moda de la velocidad del viento:

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

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

Velocidad donde se obtiene la máxima potencia del viento:

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

Densidad de potencia:

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

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

Energía por m<sup>2</sup> en un intervalo de tiempo

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

Donde t (s) es el tiempo considerado.

Luego, desde un punto de vista práctico la expresión de Weibull, proporciona un método empírico preciso para la representación de la distribución de velocidades del viento, entonces se puede decir que:

$$M_i(X_i; Y_i; Z_i; R_i) = P_i(v) = \left( \frac{K_i}{C_i} \right) \cdot \left( \frac{v}{C_i} \right)^{K_i - 1} \cdot e^{-\left( \frac{v}{C_i} \right)^{K_i}}$$

La obtención de este modelo en cualquier punto donde se realice un muestreo que dura alrededor de 3 años en el cual se mide la velocidad del viento cada pequeños intervalos regulares de tiempo y al final del muestreo se valida y completa los datos que permite construir la distribución de Weibull mediante un proceso matemático específico. Terrero Matos E. et. al 2014. "Método de inverso de la potencia de la distancia para estimar la velocidad del viento".

Es obvio que si deseamos construir un modelo que disponga de m puntos que cubran densamente el espacio 3D de la región promisoría entonces la tarea de realizar m muestreos sería significativamente costosa por lo que generalmente se proponen unas pocas torres de

muestreo con varios anemómetros a diferentes alturas, situadas en coordenadas espaciales que se consideren representativas para el muestreo; de esta forma se obtiene un muestreo en n puntos.

En estos  $j=1, \dots, n$  puntos de muestreo los modelos se obtienen mediante el tratamiento matemático de los datos pero en los puntos  $P_j=(X_i; Y_i; Z_i; R_i)$  donde no se han tomado muestras los modelos deben ser deducidos de los modelos obtenidos en los puntos de muestreo.

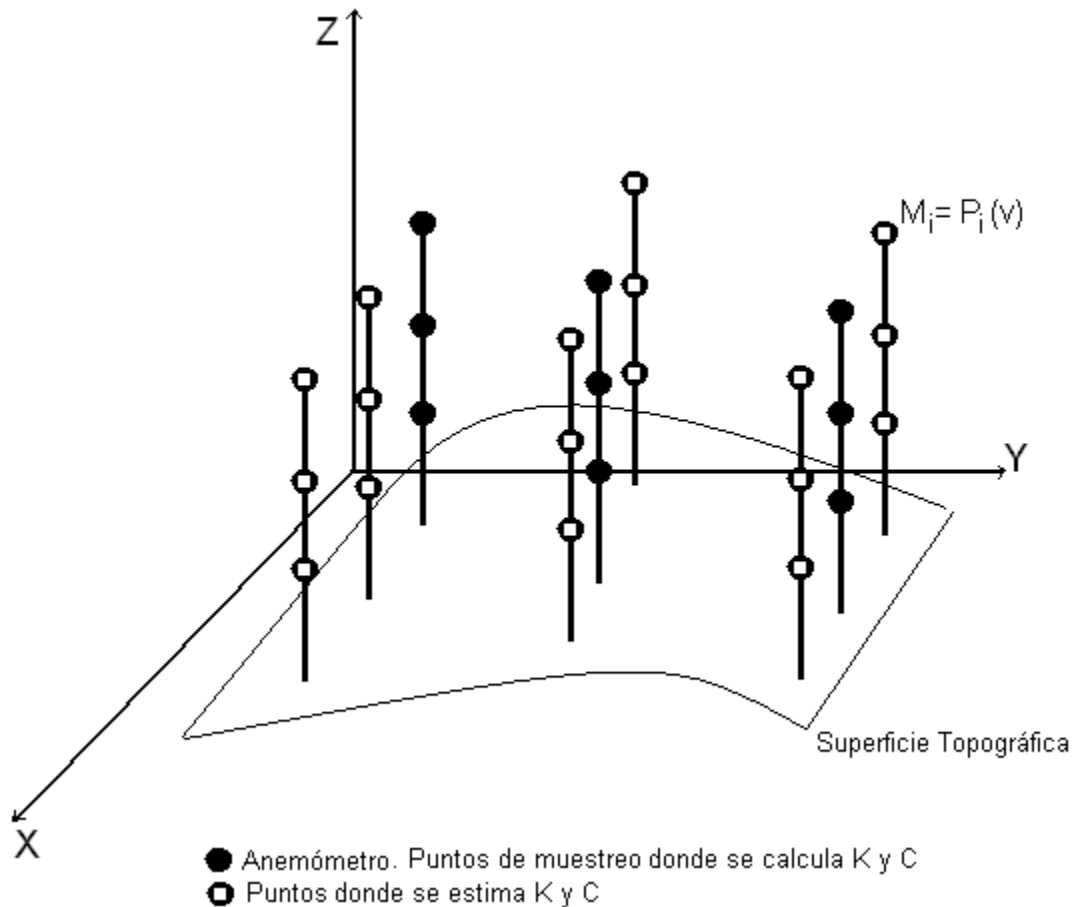


Figura 1: Modelo del potencial eolo-energético con  $m=54$  puntos 3D cuyo muestra consta de  $n=9$  puntos.

### Modelaciones en puntos perteneciente a la línea vertical de una muestra conocida

Si se desea conocer elementos tales como la velocidad  $v$  o los parámetros de Weibull en un punto  $(X; Y; Z)$  de la línea vertical donde se ha realizado un muestreo y se conocen estos elementos  $v_0$ ,  $K_0$  y  $C_0$  para alguna altura  $Z_0$  entonces se pueden utilizar fórmulas deducidas de la denominada Ley Exponencial del viento (Hellman). Mur Amada – Joaquín. 2012 "Curso de energía eólica".

$$V = V_0 \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha$$

Donde:

$Z_0$  es la altura del anemómetro con respecto al suelo en la estación de referencia

$v_0$  es la velocidad del viento en la estación de referencia

$\alpha$  es un exponente que debe ser calculado

Z altura donde se quiere conocer v.

v es la velocidad del viento calculada para la altura Z.

El exponente  $\alpha$  bajo ciertas condiciones puede ser estimado igual a 1/7 pero existen varios métodos empíricos de determinarlo. Se explicarán a continuación dos de ellos.

1. Correlación en función de la velocidad y de la altura

$$\alpha = \frac{0,037 - 0,088 \ln(v_o)}{1 - 0,088 \ln(Z_o/10)}$$

2. Correlación dependiente de la rugosidad superficial R

$$\alpha = 0,24 + 0,096 \log_{10}(R) + 0,016 \left[ \log_{10}(R) \right]^2$$

La extrapolación de los parámetros de Weibull, K y C se realiza mediante la siguiente expresión. LEGRÁ LOBAINA, A. A. 2017: "Modelos de malla basados en estimadores (A,U, $\theta$ )".

$$K = K_o \frac{\left[ 1 - 0,088 \ln\left(\frac{Z_o}{10}\right) \right]}{\left[ (1 - 0,088) \cdot \ln\left(\frac{Z}{10}\right) \right]}$$

Donde:

$K_o$  es el factor de forma a la altura  $Z_o$

K es el factor de forma a la altura Z.

En el caso de C se estima. MORENO FIGUEREDO, C. et al. 2007: Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica.

$$C = C_o \left( \frac{Z}{Z_o} \right)^\beta$$

Donde:

$C_o$  es el factor de escala en la estación a la altura  $Z_o$

C es el factor de escala a la altura Z.

El exponente se calcula:

$$\beta = \frac{[0,037 - \ln(C_o)]}{(1 - 0,088) \cdot \ln\left(\frac{Z_o}{10}\right)}$$

## Modelaciones para cualquier punto

Para obtener los valores de la velocidad o de los parámetros de la distribución de Weibull en puntos diferentes a los muestreados y que pudieran estar o no estar en la vertical de alguno de ellos el enfoque cambia y hay dos modos de resolver el problema:

- I. Obtener un modelo físico del comportamiento de la velocidad del viento y simular muestras de velocidad del viento en estos puntos. Luego se obtienen los parámetros K y C en cada punto a partir de los datos obtenidos mediante la simulación. En este enfoque se presentan serias dificultades para obtener simulaciones de v suficientemente precisas para las condiciones topográficas, de rugosidad y de comportamiento estacional y diario del viento en una región relativamente pequeña.
- II. A partir de las distribuciones de Weibull obtenidos para los  $j=1, \dots, n$  puntos de muestreo:

$$M_j(X_j; Y_j; Z_j; R_j) = P_j(v) = \left(\frac{K_j}{C_j}\right) \cdot \left(\frac{v}{C_j}\right)^{K_j-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C_j}\right)^{K_j}}$$

Se obtienen las distribuciones de Weibull para los  $i=1, \dots, m$  puntos de la malla 3D que conforman el modelo del potencial eolo-energético de la región promisoría.

Para realizar esto deberán proponerse dos modelos:

- $K = f(X; Y; Z; R)$
- $C = g(X; Y; Z; R)$

Consideramos que estos modelos pueden ser obtenidos mediante las formulaciones del tipo  $(A, U, \Theta)$  que son de amplia gama y robustas respecto a la solución de diversos y complejos problemas de estimación (LEGRÁ LOBAINA, 2017).

## Conclusiones

Se propone un enfoque viable y robusto para modelar 3D el potencial eolo-energético de una región promisoría donde se ha realizado un muestreo previo que constituyen datos experimentales. La propuesta plantea obtener los parámetros de la distribución de Weibull para los n puntos de muestreo y modelar el comportamiento de estos parámetros mediante formulaciones  $(A, U, \Theta)$  en los puntos que constituyen la malla 3D del modelo del potencial.

## Bibliografía

- Anon. Asociación Danesa de la Industria Eólica, 2000: "Conceptos sobre la energía eólica". [en línea], Manual de Referencia, Primera Parte, p. 12-13. Dinamarca. [Consultado: 11 de febrero de 2013], Disponible en: <http://www.windpower.org/es/tour/wres/shear.htm>.
- ALENCAR DO NASCIMENTO FEITOSA, E. et al. "Panorama do potencial eólico no Brasil, Projeto BRA/00/029, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Brasileiro, 2002, p.42-52.
- CARRASCO DÍAZ, Magdiel. 2013: "Reconstrucción del campo de viento para la generación de mapas de potencial eólico a lo largo de la costa del estado de Tamaulipas, México". Tesis de Postgrado. Repositorio Electrónico del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México. Consultado el: 15 de junio del 2013. Disponible en: [http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/11787/Tesis\\_final\\_Magdiel.pdf?sequence=1](http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/11787/Tesis_final_Magdiel.pdf?sequence=1).
- LEGRÁ LOBAINA, A. A. 2017: "Modelos de malla basados en estimadores (A,U,Θ)". Revista HOLOS, 33(4): 88-110. DOI:10.15628/holos.2017.5351.
- MORENO FIGUEREDO, C. et al. 2007: Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica. Grupo de trabajo para el impulso de la energía eólica. Editorial Cubasolar, La Habana. Pág.56.
- MUR AMADA, Joaquín. 2010: "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](http://www.windygrid.org/manualEolico.pdf).
- TERRERO MATOS, E; LEGRÁ LOBAINA, A.A. y LAMORÚ REYES, A. 2014: "Método de inverso de la potencia de la distancia para estimar la velocidad del viento". Ingeniería Energética Vol. XXXV, 3/2014 p. 263-273, Septiembre /Diciembre. ISSN 1815 – 5901.
- TERRERO MATOS, E; LEGRÁ LOBAINA, A.A. y CARCASSÉS CARCASSÉS, J. 2014: "Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte I Teoría y algoritmo general". Ingeniería Energética Vol. XXXVI, 2/2015, p.200-209, Mayo /Agosto ISSN 1815 - 5901.
- TERRERO MATOS, E; LEGRÁ LOBAINA, A.A. y CARCASSÉS CARCASSÉS, J. 2014: "Procedimiento para diseñar el muestreo eólico en una región promisoría. Parte II Implementación y aplicación Ingeniería Energética Vol. XXXVI, 2/2015, p.210-219, Mayo /Agosto ISSN 1815 – 5901