

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CLASE DE LAS TURBINAS EÓLICAS EN LA REGIÓN OCCIDENTAL DE CUBA Y EN ZONAS PRE-MONTAÑOSAS

Dr. C. José Augusto Medrano Hernández *, Dr. C. Conrado Moreno Figueredo* e Ing. Julio E. Vaillant Rebollar **

*Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría Cujae. Cuba

** Universidad de Ghent, Ghent University, Bélgica

E-mail: jmedrano@mecanica.cujae.edu.cu

Resumen

En este artículo se presenta una metodología que permite determinar la clase de viento de las turbinas eólicas, a efectos de su selección. Adicionalmente, se presenta un estado del arte sobre los diferentes métodos estadísticos existentes dirigidos al procesamiento de datos extremos, demostrándose que el método de Gumbel es el que mejor ajuste brinda. Como caso de estudio se seleccionó el complejo eco-turístico Las Terrazas, el cual se localiza en la zona occidental de Cuba, donde suelen ocurrir eventos meteorológicos como los huracanes, generando valores extremos de velocidad de viento. Adicionalmente, presenta un relieve pre-montañoso con alto índice de turbulencia, debido a la abundante vegetación que allí predomina. Finalmente, aplicando el método de Gumbel se determinaron la velocidad de viento de referencia y el índice de turbulencia de referencia, resultando que en el lugar bajo estudio deben instalarse máquinas eólicas tipo IA.

Palabras clave: Relieve pre-montañoso, turbina eólica, clase de viento, velocidad de viento, turbulencia.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE WIND TURBINE CLASS IN THE WESTERN PART OF CUBA AND PRE-MOUNTAINOUS ZONES

Abstract

In this article a methodology that allows to determinate the wind class of the wind turbines, to selection effects is presented. Additionally, a state of the art about the different statistical methods existent, directed to the extreme data processing, being demonstrated that the Gumbel method gives the best adjustment. As study case, the echo-tourist complex Las Terrazas was selected, which is located in the western zone of Cuba, every year happen meteorological events as hurricanes, generating extreme values of wind speed. Additionally, present a pre-mountainous relief with high turbulence index, due to the abundant vegetation that there prevails. Finally, applying the Gumbel method, the wind speed of reference and the turbulence index of reference were determined, being that in the place under study it should install wind machines class IA.

Keywords: Pre-mountainous relief; Wind turbine; Wind class; Wind speed; Turbulence.

1. Introducción

Uno de los problemas que enfrentan los ingenieros en los proyectos relacionados con la energía eólica, son los vientos extremos. Las fuerzas de los vientos provocados por huracanes son típicas de países que están cerca de la zona ecuatorial o con aguas extremadamente cálidas. Este fenómeno es el causante de daños severos.

Algunos planificadores de instalaciones eólicas evitan este fenómeno, seleccionando para el emplazamiento de las máquinas eólicas lugares alejados de estas zonas problemáticas. En algunos países, hacer esto tiene una posibilidad bastante baja, por ejemplo, Cuba, que se localiza en el Mar Caribe, donde con frecuencia se forman y desarrollan huracanes.

A los efectos del presente artículo, como caso de estudio se ha seleccionado el complejo eco - turístico Las Terrazas, localizado en el extremo oriental de la Sierra del Rosario, donde predomina un relieve pre- montañoso con un alto índice de turbulencia, y que además, se encuentra expuesto a la acción de vientos extremos originados por los huracanes, algo característico en la zona occidental de Cuba y el Caribe.

El presente trabajo tiene como objetivo principal ofrecer una metodología para la correcta selección de las turbinas eólicas, desde el punto de vista de la clase de viento.

En la actualidad existen pocos criterios cuantitativos sobre el comportamiento del flujo de vientos, principalmente en terrenos complejos como las montañas y los valles con vegetación. Los modelos teóricos o empíricos para predecir la velocidad del flujo de viento en terrenos complejos, tienen una incertidumbre de 15 % aproximadamente, lo cual se traduce en un error en la producción de energía del orden de un % aproximadamente [Moreno *et al.*, 2017]. Por esta razón, investigadores y especialistas del mundo han dirigido sus investigaciones hacia la determinación del método más apropiado para el tratamiento de los datos de vientos extremos.

En Toulet [2013] se realiza un estudio sobre los diferentes métodos para la estimación de valores extremos aplicadas a la industria eólica. Se analizan métodos como el de Gumbel, el de los r-valores máximos, el de las tormentas independientes, el método XIMIS: versión extendida del método MIS mejorado y el método POT (Peak-Over-Threshold), llegando a la conclusión de que con una serie temporal de datos lo suficientemente larga, la aplicación del método de Gumbel, utilizando valores máximos de cada época seleccionada (valores anuales usualmente) es el que brinda un mejor ajuste de los resultados.

En Hui *et al.* [2014] se realiza un análisis de los vientos extremos. Se realiza una modelación a través de una función exponencial, aplicando el método de las tormentas independientes, llegándose a la conclusión de que este método brinda una estimación real de los vientos extremos.

En Anastasiades *et al.* [2014] se publican los resultados sobre la estimación de los vientos extremos. Para ello se emplea el método de reanálisis de datos, concluyendo que su uso como una larga serie de datos de velocidad de viento, tiene numerosas ventajas, pero no especifican cuáles.

En Castellani *et al.* [2015] y Villarreal [2015] se realiza un análisis estadístico de los vientos extremos, donde se

propone emplear la distribución de Gumbel. En Natalini *et al.* [2016] se analiza la acción de los vientos extremos. Se obtienen las velocidades básicas de ocho estaciones meteorológicas en Argentina. Para ello, emplean el método de los momentos.

En Fernández [2016] se realiza un estudio sobre los distintos métodos que se emplean para el procesamiento estadístico de los vientos extremos. Estudian las distribuciones de Gumbel, Fréchet y Weibull, llegando finalmente a la conclusión de que dentro de las distribuciones asintóticas la de Gumbel es la que ha sido preferida por varios autores para condicionar el ajuste de los valores de viento extremo, aplicando técnicas como el tratamiento de la presión, en lugar de la velocidad para acelerar la convergencia de los datos.

Como se ha observado en la literatura analizada sobre los diferentes métodos para el análisis estadístico de los vientos extremos, se evidencia que se trabaja en aras de obtener resultados cada vez más exactos. Todos los trabajos analizados se basan en este tipo de estudio. Adicionalmente, varios autores coinciden con que la distribución de Gumbel es la más empleada actualmente para el análisis de variables meteorológicas debido a la calidad de sus resultados. Por lo antes expuesto, para la determinación de la clase de la turbina eólica, en el presente trabajo se emplea el método de Gumbel.

2. Materiales y métodos

2.1. Características resistivas de las turbinas eólicas

Las turbinas eólicas están diseñadas para soportar condiciones de viento de cualquier lugar, dependiendo de su «clase de viento». Los valores de diseño de las condiciones de viento deben estar claramente especificados en la documentación de la máquina. El régimen de viento para las consideraciones de carga y de seguridad de las máquinas, están divididas en condiciones de vientos normales, las cuales ocurrirán frecuentemente durante la operación normal de una maquina eólica, y las condiciones de vientos extremos, las cuales son definidas para suceder en un periodo de recurrencia de 1 a 50 años [Moreno *et al.*, 2017].

El objetivo es alcanzar la clasificación de las turbinas eólicas de acuerdo con la robustez, que claramente, varía gobernada por la velocidad del viento y los parámetros de turbulencia. En la tabla 1 se especifican los parámetros básicos que definen la clase de viento de las turbinas, de acuerdo con la norma internacional IEC 61400-1 [Asociación Española de normalización y certificación, 2006].

Tabla 1 Parámetros básicos para la definición de la clase de las turbinas eólicas. Fuente: [Asociación Española de normalización y certificación, 2006; Medrano *et al.*, 2019].

Clase de la turbina eólica	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	Valores especificados por el diseñador
A I_{ref}	0,16			
B I_{ref}	0,14			
C I_{ref}	0,12			

Donde: V_{ref} es la velocidad del viento probable en un plazo de 50 años, con un promedio de registro de 10 min, en m/s; A, B y C son las categorías designadas para las

características de altas, medianas y bajas turbulencias; I_{ref} es el valor de la intensidad de turbulencia esperado a una velocidad de viento de 15 m/s.

Las clases de turbinas, como se observa en la tabla 1, se pueden dividir en cuatro categorías (I, II, III y S). Las turbinas I, II y III se pueden considerar como estándares, las cuales presentan dentro de sus características, un tiempo de vida útil de 20 años.

Las principales diferencias de estas tres clases están bien enmarcadas en los índices de turbulencia y las velocidades de referencia que soportan, siendo las turbinas de clase IA las más robustas [Asociación Española de normalización y certificación, 2006].

Para la determinación exacta de las velocidades de viento extremas, se necesitan mediciones en un largo plazo de tiempo, lo cual en la práctica es imposible. La solución está en emplear mediciones de velocidades extremas en un tiempo más corto y combinarlas con el método estadístico más apropiado [Moreno *et al.*, 2017].

2.2. Metodología para la determinación de la clase de viento de las turbinas eólicas aplicando la distribución de Gumbel

La metodología para determinar la clase de las turbinas eólicas se describe a continuación:

2.2.1. Cálculo de la velocidad del viento de referencia (V_{ref})

El procedimiento para obtener el valor de la velocidad del viento de referencia se presenta a continuación:

a) Se seleccionan los valores de velocidades de viento máximas y con mayor duración en la ocurrencia de los eventos meteorológicos (huracanes de todas las categorías, depresiones y tormentas tropicales), registradas en los últimos diez años y se ordenan de menor a mayor.

b) Se calcula la probabilidad P_x para cada valor del período de retorno o recurrencia en años R . Los valores de P_x se calculan a través de la ecuación 1

$$P_x = \left(\frac{m}{M+1} \right) \quad (1)$$

Donde M es la cantidad de años de los cuales se poseen datos de vientos extremos (como mínimo diez) y m representa a cada año ($m=1, 2, 3, \dots, M$)

$$P_x = \left(\frac{m}{M+1} \right) \quad (1)$$

c) Calcular los valores de « y », los cuales se obtienen a partir de la ecuación 2

$$y = -\ln(-\ln(P(x))) \quad (2)$$

d) Se determina y dibuja la ecuación de la recta que tiene la forma $x = \mu + \beta \cdot y$. Esta se ajusta a la recta x vs y .

donde β es el parámetro de escala o anchura de la distribución de Gumbel y μ es la moda o valor más probable. Estos valores pueden ser obtenidos a partir de las ecuaciones 3, 4 y 5.

$$x = \mu + \beta y \quad (3)$$

$$\beta = \left(\sigma_e / \sqrt{6} \right) \pi \quad (4)$$

$$\mu = \bar{V}_e - 0,577\beta \quad (5)$$

Donde: \bar{V}_e es el valor promedio de los valores de velocidades de viento obtenidos en el inciso «a», en m/s; σ_e es la desviación estándar entre los valores de velocidad de viento obtenidos en el inciso «a», en m/s.

Como se observa, la ecuación 3 tiene la forma de una recta, la cual debe ser ajustada. La pendiente de esta recta puede obtenerse a través de Microsoft Excel, seleccionando los valores de « x » y « y » (ecuaciones 2 y 3 respectivamente), y a través de la función «Pendiente».

El valor de la ordenada, la cual interseca con el eje vertical, se puede obtener también usando Microsoft Excel, seleccionando los valores de « x » y « y », y a través de la función «Intersección. Eje».

Otra forma de obtener la ecuación de ajuste, es seleccionando los valores de « x » y « y », e insertando un gráfico del tipo «XY (Dispersión)». A través de las opciones del gráfico insertado (marcando el botón de «Línea de tendencia» y haciendo clic en la pestaña que dice «Más opciones», se podrán encontrar la ecuación de la recta de mejor ajuste y el coeficiente de regresión (R^2), los cuales se insertarán en el gráfico si se desea.

e) Se considera $R=50$ años y se obtiene, para este valor de R , el valor de la probabilidad. La probabilidad se calcula de acuerdo con la ecuación 6.

$$P_x^{50} = 1 - \left(\frac{1}{R} \right) \quad (6)$$

f) Calcular el valor de « y » para un plazo de 50 años (y^{50}). Esto puede lograrse a partir de la ecuación 7.

$$y^{50} = \ln \left[-\ln \left(P_x^{50} \right) \right] \quad (7)$$

g) Cálculo del valor extremo de la velocidad del viento promediada para un plazo de 50 años V^{50} o velocidad de referencia (V_{ref}) como también se conoce.

2.2.2. Obtención del índice de turbulencia de referencia (I_{ref})

El índice de turbulencia de referencia está en función del índice de turbulencia en el lugar bajo estudio y se calcula a partir de la ecuación 8.

$$I_{ref.} = \frac{I}{\left(0,75 + \frac{5,6}{V_{bujete}}\right)} \quad (8)$$

Donde: *I* es el índice de turbulencia existente en el sitio que se analice (se da en porciento, pero para emplearlo en la ecuación 8, hay que dividirlo entre cien); *V_{bujete}* es la velocidad del viento a la altura del buje de la máquina, en m/s.

3. Aplicación de la metodología al complejo turístico Las Terrazas. Resultados y discusión

Como el complejo Las Terrazas se localiza en la región occidental de Cuba, zona de mayor actividad de eventos meteorológicos como las tormentas tropicales y los huracanes, en aras de realizar una correcta selección de la turbina eólica a instalar, es importante considerar la acción de los vientos que generan estos eventos meteorológicos. De acuerdo a la información brindada por el Instituto de Meteorología (Insmet), durante los últimos diez años los eventos meteorológicos con mayor incidencia en la zona occidental del país son las tormentas tropicales (79), además de los huracanes categoría 1, 2 y 4.

En la tabla 2 se resumen las velocidades de viento máximas registradas, correspondientes a cada año analizado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en el acápite 2.2, basada en uso del método estadístico de Gumbel. Empleando las ecuaciones 1 - 5, se obtienen los valores de *P_x*; *y*; *β*; *μ*; *x*, cuyos resultados se presentan en la tabla 3. Adicionalmente, se muestran los valores de *σ_e* y *V_e*.

Si se llevan a una gráfica «*V*» en función de «*y*» y de acuerdo con el inciso «d», la recta que mejor se ajusta a esta gráfica *V(y)*, resulta como la que se muestra en la figura 1:

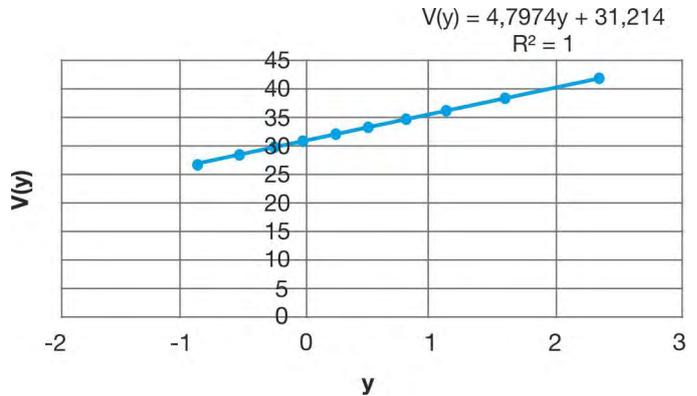


Fig. 1 Gráfico de la recta de mejor ajuste.

Como se observa en la figura anterior, el coeficiente de regresión (*R²*) es igual a uno, lo cual demuestra el buen ajuste de los resultados brindados por la distribución de Gumbel para el tratamiento de valores extremos, en este caso, relacionados con eventos meteorológicos. Por otro lado, la ecuación de la recta de mejor ajuste *V(y)* para la determinación de la velocidad de referencia (*V_{ref.}*) tiene la forma de la ecuación 9.

$$V(y) = 4,7974y + 31,214 \quad (9)$$

Tabla 2. Velocidades máximas del viento registradas en el período 2009-2018

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Velocidad de viento (m/s)	30,6	36,7	33,8	34,4	26,7	36,6	32,5	36,5	39,9	32,1

Tabla 3 Valores de probabilidad del valor extremo

m	Velocidad máxima anual (m/s)	<i>P_x</i>	<i>y</i>	<i>σ_e</i>	<i>β</i>	<i>V_e</i> (m/s)	<i>μ</i>	<i>x</i>
1	26,7	0,09091	-0,8746	3,7419	4,7992	33,98	31,21	27
2	30,6	0,18182	-0,5334					28,6
3	32,1	0,27273	-0,2618					30
4	32,5	0,36364	-0,0115					31,2
5	33,8	0,45455	0,2377					32,4
6	34,4	0,54545	0,5006					33,6
7	36,5	0,63636	0,7941					35
8	36,6	0,72727	1,1443					36,7
9	36,7	0,81818	1,6061					38,9
10	39,9	0,90909	2,3506					42,5

3.1. Determinación del valor extremo de la velocidad del viento promediada para un plazo de 50 años (V^{50})

El valor más alto de la velocidad del viento promediado en un período de 50 años V^{50} , se obtiene sustituyendo el valor de y^{50} en la ecuación de la recta ajustada anteriormente (ecuación 9).

$$P_x^{50} = 1 - \left(\frac{1}{R} \right) = 1 - \left(\frac{1}{50} \right) = 0,98 \quad (10)$$

$$y^{50} = \ln(-\ln(P_x^{50})) = \ln(-\ln 0,98) = 3,902 \quad (11)$$

$$V^{50} = 4,7974y + 31,214 = 4,7974(3,902) + 31,214 = 49,9 \text{ m/s} \quad (12)$$

De acuerdo con la tabla 1, para una velocidad de referencia $V_{ref.} = 49,9$ m/s, corresponde a una turbina eólica clase I.

3.2. Índice de turbulencia de referencia (I_{ref})

Para el caso del complejo Las Terrazas el índice de turbulencia es estimado como alto, algo normal en zonas pre-montañas, debido a la abundancia de vegetación y otros obstáculos existentes. También dada la carencia de mediciones de los parámetros del viento para la selección de la turbina eólica, se considera el valor máximo del índice de turbulencia de referencia ($I_{ref} = 0,16$). Para $I_{ref} = 0,16$, de acuerdo con la tabla 1, corresponde a una turbina eólica tipo A, es decir, en la zona donde se encuentra el complejo Las Terrazas es necesario instalar una turbina eólica Clase IA.

En resumen:

Velocidad de viento de referencia V_{ref} (m/s)	49,9
Índice de turbulencia de referencia (I_{ref})	0,16
Clase de viento de la turbina eólica a instalar	IA (de acuerdo con la tabla 1)

4. Conclusiones

El principal propósito del presente trabajo fue desarrollar una metodología completamente reproducible para cualquier lugar, dirigida a determinar la clase de las turbinas eólicas.

De acuerdo con la tabla 1, para una velocidad de referencia $V_{ref.} = 49,9$ m/s, corresponde a una turbina eólica clase I, resultado que coincide con los estudios realizados por el Instituto de Meteorología y por la Empresa INEL (Empresa de Proyectos para la Electricidad), acerca de los vientos extremos en la región occidental de Cuba y de la selección de la clase de viento de la turbina a instalar en esta zona, por lo que se llega a dos importantes conclusiones que confirman la validez del análisis realizado previamente en este trabajo:

1. Para zonas pre-montañas y la región occidental de Cuba se deben seleccionar turbinas eólicas de clase I estándar, con altura de buje de 50 m porque

los vientos extremos pronosticados en los últimos diez años, con recurrencia de 50 años, no exceden la velocidad extrema de diseño admisible.

2. En caso de instalar parques eólicos en zonas pre-montañas o en la región occidental de Cuba, utilizando máquinas más altas, es imprescindible comprobar su resistencia efectiva y si se requiere, definir los parámetros de diseño de conjunto con el proveedor.

5. Referencias bibliográficas

- ANASTASIADES, G. & MC SHARRY, P. E. (2014). Extreme value analysis for estimating 50 year return wind speeds from reanalysis data, in *Wind Energy*, vol. 17, pps. 1231-1245, DOI: 1210.1002/we.1630.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2006). *IEC 61400-1, Aerogeneradores. Parte I: Requisitos de diseño*. Madrid, España, tercera edición, referencia consultada en abril 2020.
- CASTELLANI, F., TERZI, L. & ASTOLFI, D. (2015), Applied statistics for extreme wind estimate, in *Wind Energy*, vol. 18, pp. 613 - 624, DOI: 610.1002/we.1715.
- DOI: <http://dx.doi.org/274701510.274712989/was.274702014.274701519.274701592.274701169>, (2014).
- FERNÁNDEZ LORENZO, I. (2016). Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas. En *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. VII, No. 2, pp. 15 - 25, (2016). ISSN: 2223-1781.
- MEDRANO HERNÁNDEZ, J.A, MORENO FIGUEREDO, C. & VAILLANT REBOLLAR, J. E. (2019). Estudio de prefactibilidad técnica del aprovechamiento del viento como recurso energético en zonas pre - montañas. En revista *Ingeniería Energética*, vol. 40, no. 3, ISSN: 1815 - 5901, La Habana, Cuba.
- MORENO FIGUEREDO C. & OTROS (2017). *Doce preguntas y respuestas sobre energía eólica*. La Habana, Cuba, vol. 1, ISBN: 978-959-7113-51-5.
- NATALINI, B., ATENCIO, B. A. & ZARACHO, J. I. (2016). Análisis de velocidades de viento extremas de 11 estaciones en Argentina - perspectivas para una actualización del mapa de vientos extremos. 24 Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 2016, pp. 1-14. Consultado: 12 de enero de 2021. Disponible en: <https://jornadasaie.org.ar/Nuevositio/wp-content/themes/jornadas-aieanteriores/2016/contenidos/trabajos/2012.pdf>.
- Toulet Umansky, D. (2013). Análisis de las metodologías existentes de cálculo de extremo aplicadas a la industria eólica. Tesis de maestría. Consultado: 5 de enero de 2021. Disponible en <https://docplayer.es/20683670-Analisis-de-las-metodologias-existentes-de-calculo-del-viento-extremo-aplicadas-a-la-industria-eolicamemoria.html>.
- VILLARREAL MARIMÓN, Y.J. (2015). Aproximación metodológica para determinar curvas de intensidad - duración - frecuencia, utilizando la distribución mixta de probabilidad Doble Gumbel, Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia.
- YI-HUI Q.Y. & ZHENG NONG-LI (2014). An alternative method for estimation of annual extreme wind Speeds, in *Wind and Structures*, vol. 19, No. 2, pp. 169 - 184. ISSN 274701226-274706116,

Recibido: 22 de junio de 2021.

Aceptado: 23 de julio de 2021.