

Modelo de análisis de cargas máximas en aerogeneradores producidas por vientos extremos

Omar Herrera - Sánchez, Wolfgang Schellong, Vladimir González - Fernández

Recibido el 15 de marzo de 2010; aceptado el 25 de mayo de 2010

Resumen

La utilización de la energía eólica mediante los aerogeneradores en zonas de alto riesgo de ocurrencia de Huracanes viene siendo un reto importante para los diseñadores de parques eólicos a nivel mundial desde hace algunos años. Los aerogeneradores no están diseñados normalmente para soportar este tipo de fenómenos y es por esto que se marginan las zonas de alta incidencia de ciclones tropicales de la planificación, lo cual, en ocasiones, imposibilita totalmente la utilización de esta fuente renovable de energía, ya sea porque el país es muy pequeño, o porque coincida plenamente la zona de mayor potencial con la de alto riesgo. Para contrarrestar esto se ha elaborado un modelo de análisis de cargas máximas producidas por los vientos extremos en aerogeneradores. Este modelo tiene la ventaja de determinar en un sitio escogido para la instalación en un parque eólico las micro-zonas con mayor riesgo de presentar cargas de vientos por encima de las admisibles por las clases estándares de aerogeneradores.

Suponemos además que modelo es una fuerte herramienta en la planificación de parques eólicos, los cuales en la actualidad son destinados a zonas de baja incidencia de huracanes o tormentas tropicales, factores que para algunos países son realmente muy problemáticos por la alta incidencia que presentan de estos fenómenos extremadamente destructivos.

Palabras claves: Aerogeneradores, cargas de viento máximas, modelado de parques eólicos.

Model of analysis of maximum loads in wind generators produced by extreme winds.

Abstract

The use of the wind energy by means of the wind turbines in areas of high risk of occurrence of Hurricanes comes being an important challenge for the designers of wind farm at world for some years. The wind generator is not usually designed to support this type of phenomena, for this reason the areas of high incidence of tropical hurricanes of the planning are excluded, that which, in occasions disables the use of this renewable source of energy totally, either because the country is very small, or because it coincides the area of more potential fully with that of high risk. To counteract this situation, a model of analysis of maxims loads has been elaborated taken place the extreme winds in wind turbines of great behavior. This model has the advantage of determining, in a chosen place, for the installation of a wind farm, the micro-areas with higher risk of wind loads above the acceptable for the standard classes of wind turbines.

Key words: Wind turbines, wind loads, modeling of wind farm.

1. Introducción.

En la actualidad el uso de aerogeneradores para producir electricidad aprovechando la energía eólica se ha convertido en una de las principales tecnologías en la utilización de fuentes energéticas renovables a nivel mundial. Países como Alemania, España, Dinamarca, Holanda entre otros han apostado por la inclusión de este tipo de maquinas en el fortalecimiento de sus sistemas eléctricos nacionales, siendo los mismos los que presentan mayor producción de electricidad generada a partir del viento.

El tamaño unitario de los aerogeneradores utilizados en las instalaciones se ha ido incrementando paulatinamente a lo largo de estos pasados años pasando de aerogeneradores de 15m de diámetro, empleados en la década de los 80, a las actuales maquinas en el entorno de los 120 metros de diámetros [3]

Estas modernas turbinas son diseñadas de acuerdo a estándares internacionales y códigos con la intención de que la turbina eólica pueda resistir las cargas con una probabilidad de supervivencia bien definida. Estos códigos y estándares son generalmente basados en condiciones europeas y norteamericanas y no incluyen experiencias de áreas con fenómenos tropicales como los Huracanes. En principio no es un problema obtener un diseño de aerogeneradores que pueda resistir o sobrevivir al menos altas velocidades de viento aun cuando pueda ser huracanados [6]. El problema real es el costo que estos equipos tendrían si se diseñan con características tan especiales.

Uno de los problemas que tienen los ingenieros y trabajadores en el área de la planeación de parques eólicos son los vientos extremos. Las fuerzas de Huracanes son típicas de países que están cerca de la zona ecuatorial o con aguas bordeando sus costas extremadamente cálidas, y este fenómeno es el causante de daños severos en estos países. Algunos planificadores de parques eólicos evitan este fenómeno tratando de diseñar los parques eólicos en lugares alejados de estos sitios (problemáticos), pero, en algunos países hacer esto es realmente una posibilidad bastante baja.

Este artículo describe la elaboración de un modelo físico-matemático de análisis de cargas extremas de viento en aerogeneradores el cual posibilitaría la disminución de afectaciones por cuestiones de roturas totales o parciales de las maquinas que se deseen ubicar en zonas de riesgo de huracanes ayudando de esta forma a la planeación de parques eólicos más seguros.

2. Características resistivas de los aerogeneradores.

Las condiciones externas a ser consideradas en el diseño de los aerogeneradores son dependientes del sitio intencionado o de ubicación de cada tipo para una instalación. Las clases de aerogeneradores son definidos en términos de velocidad de viento y parámetros de turbulencia. La intención de las clases es la de cubrir la mayor parte de los usos que estas maquinas puedan tener [9].

Los aerogeneradores están diseñados, para soportar condiciones de viento definidas en la (11), dependiendo de la "clase" que estos aerogeneradores posean. 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 los aerogeneradores están divididas en condiciones según [9] en 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. [9]

Los valores de velocidad de viento y parámetros de turbulencia son utilizados para representar los valores característicos de sitios diferentes y no dar una representación exacta de ningún sitio en específico y esto entra dentro de la categoría de evaluación de las condiciones externas. [9]

El objetivo es de alcanzar la clasificación de los aerogeneradores con la robustez, que varía claramente, gobernada por la velocidad de viento y los parámetros de turbulencia. En la tabla (1) se especifican los parámetros básicos que definen las clases de aerogeneradores [9].

Tabla No.1 - Parámetros básicos para clases de turbina. [9]

Clase de la Turbina Eólica	I	II	III	S
Referencia(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} : Velocidad del viento de referencia con un promedio de registro sobre los 10 min.

A, B y C: Categorías designadas para características de altas, medianas y bajas turbulencias.

I_{ref} : Valor de intensidad de turbulencia esperado para 15 m/s.

Las clases de turbinas como se puede apreciar en la tabla (1) se pueden dividir en 4 categorías, I, II, III y S. En el caso de las turbinas I, II, III, se pueden considerar como turbinas estándares, las cuales presentan dentro de sus características un tiempo de vida útil de 20 años según [9].

Las principales diferencias de estas 3 clases están bien enmarcadas en los índices de turbulencia y las velocidades de referencia que soportan, siendo las turbinas de clase I tipo A las mas robustas para esta serie de turbinas estándares. Toda esta información está incorporada a la base de datos del modelo, con el objetivo de que sea seleccionada según el caso de condiciones externas, la turbina eólica indicada.

3. Modelo de análisis de carga propuesto

Las turbinas eólicas deben ser diseñadas para operar en ambientes muy estocásticos para el menos 20 años acorde con [9]. En adición con el ciclo natural de cargas inducidas por los mismos efectos inerciales de la estructura, las cargas también son provocadas por cambios temporales en las velocidades de viento, dirección y verticidad y esto ha sido un reto para los diseñadores de estas maquinas por mucho tiempo. [8].

Los fenómenos más peligrosos que existen en la clasificación de vientos extremos son los Huracanes y las tormentas tropicales. Muy pocos diseñadores de aerogeneradores hacen sus productos para que resistan un evento de estas categorías, debido a la poca demanda que tienen, y principalmente a los elevados costos de construcción.

Los Huracanes son miembros de una familia de ciclones llamados Ciclones Tropicales. Al oeste del meridiano estas tormentas son llamadas Tifones. En la india y Australia ellas son llamadas simplemente Ciclones. [2]. Los Huracanes se clasifican según la escala Saffir-Simpson (Tabla 1) en orden de su velocidad. Nuestro trabajo persigue la modelación de este fenómeno pero solamente en el sector correspondiente al área a analizar y no a toda el área que abarca el huracán el cual solamente entre pared y pared del ojo pudiera abarcar un diámetro entre 16 y 64 km [2], distancia que para los efectos de planificación de parques es desmesuradamente grande y por lo tanto inservible.

Tabla No. 2 - Escala Saffir-Simpson [4]

Categoría de Huracanes	Rango de Velocidades Km/h)
1	119-153
2	154-177
3	178-209
4	210-249
5	>249

En la gran mayoría de los proyectos de planificación de parques eólicos es normal evitar para la instalación de estas máquinas los sitios que pudieran tener influencia de estos fenómenos meteorológicos extremos, pero la realidad es que existen países que desean introducir la tecnología de generación de electricidad con maquinas eólicas donde es imposible evitar zonas de riesgo. En algunos casos porque la superficie de estos

países es demasiado pequeña, y en otros casos porque tienen solo una zona con alto potencial de viento dejando sin opciones a los diseñadores de parques eólicos.

El modelo que se propone tiene como intención localizar, en un sitio ya designado por el planificador del parque eólico, los lugares de mayor incidencia de las cargas de viento que pueden afectar a una turbina eólica que se encuentra, hipotéticamente, en cada uno de los puntos de análisis. Este modelo está basado en el análisis de cargas máximas de viento sobre estructuras, según [7], norma raíz para todos los análisis de estructuras en Cuba. Esta norma cubana usa como soporte un compendio de normas internacionales como la ISO 4354: 1997 “*Wind action on structures*” and ASCE 7 – 98. “*Minimum design loads for buildings and other structures*” por lo cual presenta aval suficiente para realizar este tipo de análisis.

Los aerogeneradores son estructuras las cuales son consideradas especiales según la referencia [7]. Esta clasificación viene dada producto a su predominio vertical, fundamentalmente en su forma. Esta clasificación se pone de manifiesto en los valores de algunas variables de cálculo estructural las cuales juegan un papel decisivo en este análisis de cargas máximas producidas por vientos extremos en la misma.

3.1 Análisis de cargas máximas

El análisis de cargas viene dado por la determinación de las distintas presiones que afectan al aerogenerador, y estas se dividen en 3:

- Análisis de las cargas estáticas sobre la estructura
- Análisis de las cargas dinámicas sobre la estructura.
- Análisis de la carga total sobre la estructura.

La carga de viento sobre edificios y obras debe determinarse como la suma de las componentes estáticas y dinámicas. La componente estática de la carga de viento es la que corresponde al valor medio de la velocidad del viento, la cual es determinada con un intervalo de recurrencia y tiempo promedio dado, el cual es fijado a partir de estudios estadísticos de la variable extrema considerada. [7]

La componente estática de la carga de viento debe ser considerada en todos los casos. La componente dinámica de la carga de viento es la que corresponde al valor de la componente fluctuante de la velocidad del viento. Su magnitud depende en gran medida a la respuesta dinámica de la estructura debido a las pulsaciones provocadas por el viento. [7]

3.1.1 Análisis de las cargas estáticas sobre la estructura.

Cuando se tengan observaciones directas de las velocidades básicas del viento, se podrán calcular las presiones básicas características del viento en una superficie normal a su dirección, mediante la ecuación:

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1.6 \cdot 10^3} \quad (kN/m^2) \quad (1)$$

Donde:

q_{10} presión básica característica del viento correspondiente a velocidades del aire en terrenos llanos y abiertos a una altura de 10 m sobre el terreno, (kN / m²).

V_{10} velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10 m sobre el terreno, (m/s).

En muchas ocasiones la data histórica de vientos registrados en el paso de un evento de este tipo no existen pero este valor de q_{10} es también característico de cada región con que se trabaje. Ejemplo de esto Cuba esta dividida en 3 regiones:



Regionalización según las presiones básicas del viento

Zona I - Que comprende las provincias: Pinar del Río, La Habana, Ciudad de la Habana, Isla de la Juventud, Matanzas, Villa Clara y Cienfuegos.

$$q_{10}=1,3 \text{ (} kN / m^2 \text{)}$$

Zona II - Que comprende las provincias de Sancti Spiritus, Ciego de Ávila y Camagüey.

$$q_{10}= 1,1 \text{ (} kN / m^2 \text{)}$$

Zona III – Que comprende las provincias de Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo.

$$q_{10} = 0,9 \text{ (} kN / m^2 \text{)}$$

Este valor de q_{10} es representativo en muchas ocasiones de cualquier lugar que se encuentre en una de estas zonas, pero siempre es mas exacto tener el valor de velocidad de la zona para el cálculo de la presión básica en la estructura (ecuación 1)

El valor de carga estática total máxima es calculado por el modelo mediante la ecuación que propone la Norma Cubana [7]

$$Q = q_{10} . C_t . C_s . C_h . C_r . C_{ra} . C_f \text{ (} kN / m^2 \text{)} \quad (2)$$

Siendo:

Q : Presión estática del viento (kN / m^2)

q_{10} : Presión básica del viento (kN / m^2)

C_t : Coeficiente de recurrencia

C_s : Coeficiente de topografía

C_h : Coeficiente de altura

C_r : Coeficiente de ráfaga

C_{ra} : Coeficiente de reducción

C_f : Coeficiente de forma.

Todos los coeficientes aquí expuestos están calculados según las recomendaciones de la Norma Cubana [7] para estructuras especiales, pero haremos especial énfasis en el coeficiente de altura y de forma.

Después de definir el perfil de viento teniendo en cuenta el valor de la rugosidad del terreno (Z_0) se determina la variación de la velocidad del viento producto a los accidentes topográficos que afectan al sitio. Solo está contemplado en la norma valores predeterminados para cada accidente geográfico, pero teniendo en cuenta que el modelo propuesto no puede depender del usuario para designar cada accidente geográfico y realizar cálculos extremadamente engorrosos, se elaboro un sub-modelo de análisis del terreno en cuestión.

Para esto se elaboro una red de puntos en el software MatLab exportadas de un modelo de evaluación de recursos eólicos como el WAsP [1], que presenta salidas de valores topográficos según la resolución de corrida, estableciendo así como cláusula que todo punto de la red es un aerogenerador en potencia. MatLab es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory” es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices.

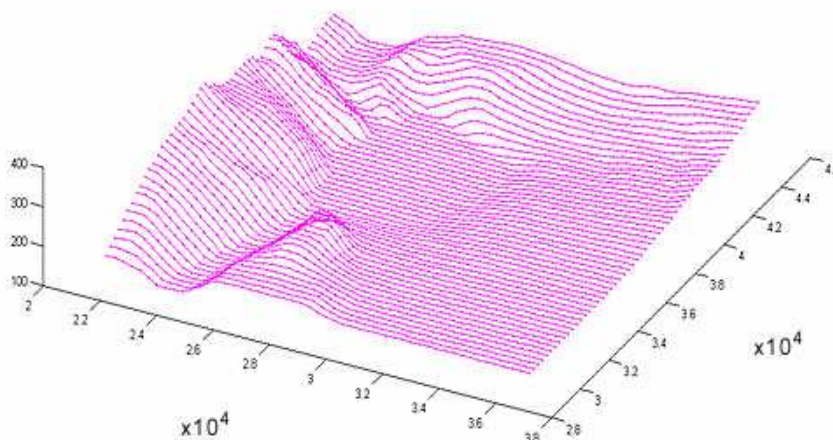


Figura 1. Representación de la matriz de puntos en el terreno

El coeficiente de altura C_h se ve modificado en todo momento por las condiciones topográficas del terreno quedando en resumen un C_h modificado para cada accidente geográfico:

$$C_{h,mod} = C_h \left[1 + \Delta S_{z,max} \left(1 - \frac{|x|}{K_{red} L_H} \right) e^{-\left(\frac{a \cdot z}{L_H} \right)} \right]^2 \quad (3)$$

Donde:

C_h Coeficiente de altura para un terreno llano

$\Delta S_{z,max}$ Factor relativo de incremento de la velocidad en la cresta cerca de la superficie

a Coeficiente de decaimiento del incremento de la velocidad del viento con la altura.

X Distancia (corriente arriba o abajo del viento) medida desde la cresta hasta la fachada de la estructura en metros.

Z Altura sobre el nivel del terreno local en metros.

L_H Mitad del ancho de la colina o del valle.

K_{red} Factor iniciador del cálculo de $C_{h,mod}$

Las presiones básicas de viento están afectadas, según la expresión (2), por el coeficiente de forma o aerodinámico (C_f) para tener en cuenta la forma, los volúmenes, el ángulo de las superficies expuestas al viento, es decir, el carácter aerodinámico de la estructura. [7].

Esta estructura entra, como se dijo en un inicio, dentro de la clasificación de estructuras especiales y en este caso se decidió para realizar un análisis más riguroso dividir en 3 partes la misma, torre, góndola y aspas. Ya subdividida la estructura se puede realizar un análisis de carga individual y un análisis de resistencia general tomando en cuenta los 3 componentes unidos.

Este coeficiente de forma es usado para el cálculo de la fuerza de arrastre que realiza el viento sobre la estructura y es por lo tanto dependiente del número de Reynolds que posea el flujo.

3.1.2 Análisis de cargas dinámicas

Teóricamente, la componente dinámica de la carga de viento es necesaria considerarla en el cálculo de todas las construcciones. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados alcanzados en investigaciones desarrolladas en diferentes países, se puede concluir que:

La componente dinámica de la carga de viento debe ser considerada en obras y estructuras con períodos de oscilaciones propias mayores de $T = 1,0$ s, como ocurre en: torres, chimeneas, postes de transmisión, mástiles; en edificios altos y por lo tanto son los aerogeneradores estructuras que también corresponden a esta categoría especial. [7].

Los valores normativos de la componente dinámica de la carga de viento deben determinarse para cada forma de oscilación de la obra a partir de un esquema de fuerzas inerciales aplicadas sobre las masas concentradas en las cuales se haya subdividido la obra según el método adoptado, quedando la ecuación de las cargas dinámicas que actúan sobre la estructura de la siguiente forma: [7]

$$Q_D = \sum_{i=1}^j M_j \cdot C_i^D \cdot C_{CE} \cdot N_{ji} \text{ (kN / m}^2\text{)} \quad (4)$$

Donde:

Q_D : Carga dinámica sobre la estructura

M_j : (j) ésima masa concentrada en kg en cada uno de los componentes de la estructura.

C_i^D : Coeficiente dinámico en cada nodo (i).

C_{CE} : Coeficiente que tiene en cuenta la pulsación con la altura de la estructura.

N_{ji} : Aceleración reducida de la "j" ésima masa, m/s².

El modelo de análisis de carga dinámica mantiene también en este caso el en 3 unidades torre, góndola y aspas del aerogenerador.

3.1.3 Análisis de cargas totales

El análisis de resistencia general es la incorporando el calor de la carga dinámica al de carga estática siendo el valor de presión total de arrastre:

$$Q_t = Q + Q_D \text{ (kN / m}^2\text{)} \quad (5)$$

La traducción de esta carga total en la resistencia del aerogenerador y su clasificación según la clase en la norma [9] viene dada por la búsqueda de la superficie equivalente a esa carga generada y por su puesto la nueva velocidad que existiría para obtener la misma carga con la superficie equivalente. En nuestro caso este valor de velocidad se desprendería de la ecuación de fuerza de arrastre de cuerpos sumergidos en un fluido con velocidad. [10]

$$V = \sqrt{\frac{2Q_t}{\rho C_d}} \quad (6)$$

Donde:

Q_t Fuerza de arrastre del viento sobre la estructura.

C_d Coeficiente de arrastre.

ρ Densidad del aire en el sitio.

V Velocidad del viento para la nueva superficie equivalente.

Es necesario abundar en que el coeficiente de arrastre C_d viene dado por la estructura equivalente considerada, en este caso un cilindro de superficie lisa circular, el cual para valores de Reynolds superiores a $3 \cdot 10^6$ su valor de C_d oscila entre 0,5 y 0,7 respectivamente, siendo estos mismos los valores máximos y mínimos de dicho coeficiente. También es importante aclarar que este valor de Reynolds no debe ser nunca menor de $3 \cdot 10^6$ ya que este modelo está diseñado para velocidades de categoría de Huracán según tabla 1 y el mínimo valor de velocidad que pudiera presentarse para nuestro análisis es el de Huracán grado 1 con una velocidad mínima de 33 m/s. Este valor de velocidad solo generaría valores de Reynolds inferiores a $3 \cdot 10^6$ si el valor del diámetro de nuestra estructura fuera igual a 1.19 m, siendo esto imposible que ocurra, pues todos los componentes analizados por nuestro modelo y incluyendo el cilindro equivalente tienen valores de longitud y diámetro superiores a 2 m. y para Reynolds $> 10^7$ se considera $C_d = 0.7$ o superior según [10].

El otro análisis que el modelo desarrolla es el de recalcular el valor de velocidad sustituyendo esta vez la presión de salida del modelo por la presión básica de la región trabajada (ecuación 1) y de esta forma obtener un valor de velocidad incrementada sobre la inicial básica debido a la afectación de la misma por los coeficientes de las ecuaciones (2)(4).

La diferencia entre estos dos valores viene debido a la simplicidad de la ecuación (1) con el factor 1.6 en el denominador y la utilización de un coeficiente único general en el cálculo de velocidad utilizando una superficie equivalente (6), que aunque podamos compararla en área de contacto con el flujo no puede integrar un coeficiente único que caracterice a todas las estructuras que el trata de igualar, como palas, góndola y torre, todas con coeficientes C_d distintos. Por esta razón, utilizando la misma altura para la superficie equivalente, el coeficiente C_d se modifica según la ley (Longitud /Diámetro) establecida en [10].

El cálculo de estas dos velocidades nos posibilita establecer un rango de comparación con los valores de velocidad en la tabla 1 *Parámetros básicos para clases de turbina* [9], determinando el rango de velocidades máximas posibles en un punto de nuestra red (aerogenerador).

Un ejemplo claro de este análisis se reduce al análisis de carga en un sitio cualquiera con condiciones Huracanadas en el cual se desea ubicar un parque eólico. (Figura 2)

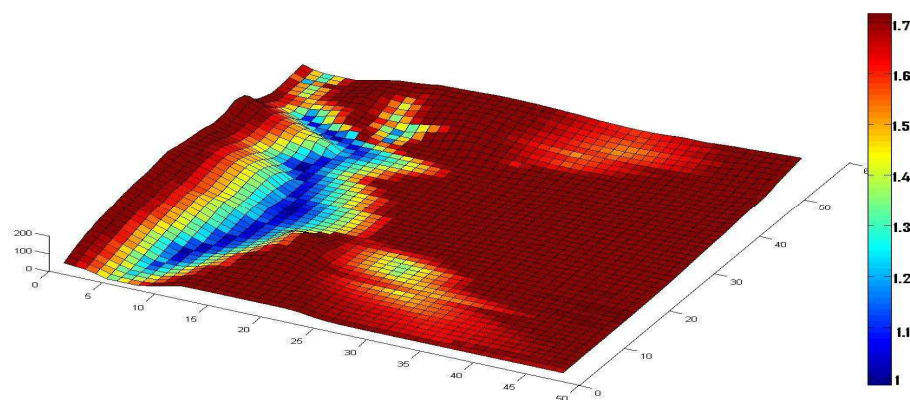


Figura 2 Representación de las cargas máximas de viento en la región. Escala (kN/m^2)

Las características de las maquinas pueden ser definidas por el usuario, pero la respuesta de cuáles son los puntos de máximas cargas se mantendrán constante pues esto depende de la topografía del terreno. Solamente variará en cada caso de cambio del aerogenerador la cantidad de puntos habilitados para la planificación del parque.

Siempre que se mantengan los mismos tiempos de recurrencias propuestos por la Norma [9], en este modelo se pueden determinar en el sitio escogido las micro-zonas con cargas realmente destructivas para la maquina con el paso de un Huracán y eliminarlas del proceso de planeación del parque. Además de esto es posible, en caso, de que todas las zonas del mapa sean de elevadas cargas, definir cuáles son los puntos en la red que presentan menos cargas y seleccionarlos como “habilitados” en el modelo de planificación de parques eólicos, para instalar las turbinas. Esto siempre sería poniendo como respuesta en el modelo de planificación, el riesgo que se comete al utilizar estos puntos.

4. Conclusiones.

1. Mediante la utilización de un programa de cálculo, Matlab fue posible elaborar un modelo de análisis de cargas máximas de viento para zonas con relieves variados, incrementando así las posibilidades de utilización efectiva de este modelo.
2. El modelo propuesto es capaz de realizar el análisis de cargas extremas de viento en los hipotéticos aerogeneradores en el terreno, en todos los sectores de dirección de viento que defina el usuario. Este aspecto es especialmente importante debido a que el valor del coeficiente de altura cambian constantemente según la topografía y la dirección de viento.
3. La detección de zonas de elevadas cargas producidas por los vientos huracanados en los sitios ya designados para la planeación del parque eólico evitaría cuantiosas pérdidas materiales y monetarias, pues cada una de estas maquinas presenta un costo aproximado de 1225 Euros por kW instalado [5] cual significa en valores globales que un aerogenerador común de 1 MW de potencia costaría 1 225 000 Euros. Si se suma a esto que un parque eólico es el conjunto de varios aerogeneradores y que la tendencia actual es a producir maquinas de mayor altura y mayor potencia, es evidente que un modelo de análisis de este tipo sería de gran utilidad en la planificación del parques eólicos.

5. Referencias.

1. **ADAMOWICZ, M. y ALBANO, A.** "Nesting two dimensional shapes in rectangular modules". *Computer Aided Design* 1976. vol. 8, nº 1, p. 27–33.
2. **AGARWAL, P. K.; FLATO, E., et al.** "Polygon decomposition for efficient construction of Minkowski sums". *Computational Geometry Theory and Applications*. 2002. vol. 21, p. 39–61.
3. **AMENTA, N.** Computational geometry software En *Handbook of Discrete and Computational Geometry*. Boca Raton: Goodman, J.E., O'Rourke, J. (Eds.), CRC Press LLC, 1997, cap. 52, p. 951–960.
4. **GOMES, A. M. y FERNANDO OLIVEIRA, J.** A GRASP Approach to the Nesting Problem. En *4th Metaheuristics International Conference MIC'2001*. 2001.
5. **ART, R. C.** *An approach to the two dimensional irregular cutting stock problem*. IBM Cambridge Scientific Centre. 1966
6. **ARZOLA J.** *Sistemas de Ingeniería*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2000.
7. **ARZOLA J.; R. SIMEÓN, et al.** El método de Integración de Variables. En *III Seminario Intensive Workshop on Optimal Design of Materials and Structures*. Paris. 2003.
8. **BURKE E.K.; HELLIER R.S.R., et al.** "Complete and robust no-fit polygon generation for the irregular stock cutting problem". *European Journal of Operational Research*. 2007. vol. 179, p. 27–49.
9. **GOMES, A. M. y OLIVEIRA, J. F.** "A 2-exchange heuristic for nesting problems". *European Journal of Operational Research*. 2002. vol. 141, p. 359–370.
10. **LIU HU-YAO y HE YUAN-JUN.** "Algorithm for 2D irregular-shaped nesting problem based on the NFP algorithm and lowest-gravity-center principle". *Journal of Zhejiang University SCIENCE*. 2005, ISSN 1009 3095 (Print), ISSN 1862 1775.
11. **YUPING, J. y SHOUWEI, Z. C.** "A very fast simulated re-annealing algorithm for the leather nesting problem". *Int J Adv Manuf Technol*. 2005. p. 1113–1118.

Omar Herrera - Sánchez¹, Wolfgang Schellong², Vladimir González - Fernández³

1. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables - CETER

Calle 114 #11901, entre 119 y 127. Marianao. Ciudad de La Habana. CP 19390. Cuba

Telefono: (537) 266 3607 Fax: (537) 260 2267

E-mail: oherreraz@ceter.cujae.edu.cu

2. Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia, Alemania

E-mail: wolfgang.schellong@fh-koeln.de

3. Departamento de Mecánica Aplicada

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" - ISPJAE

Calle 114 #11901, entre 119 y 127. Marianao. Ciudad de La Habana. CP 19390. Cuba

Telefono: (537) 266 3612 Fax: (537) 260 2267

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