

## AVALIAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZANDO SIMULAÇÕES ESTOCÁSTICAS MONTE CARLO

Francisco de Assis Leandro Filho, fco07leandro@gmail.com<sup>1</sup>  
Francisco Ilson da Silva Junior, ilson@ufc.br<sup>1</sup>  
Orion Lima Duarte Junior, orionduarte@hotmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, mestrado@posmec.ufc.br,

### Código

CONEM2012-0367

**Resumo:** A avaliação estrutural de turbinas eólicas é um problema que depende de variáveis tais como o regime de ventos, tipo e dimensões da turbina eólica, bem como as incertezas relacionadas a esses fatores. Para se inserir as incertezas encontradas na avaliação de turbinas eólicas, são estabelecidas distribuições de probabilidade para os parâmetros físicos do meio. No presente trabalho propõe-se uma análise estrutural probabilística utilizando o método de elementos finitos estocásticos para a modelagem das incertezas associadas à geração de energia eólica. Avalia-se a resposta da estrutura a cargas aleatórias, para uma análise de estabilidade do sistema. Com esse intuito foi desenvolvido um modelo de elementos finitos com o programa comercial ANSYS capaz de reproduzir com fidelidade o comportamento da torre eólica submetida a cargas produzidas pelo vento. Uma vez que o carregamento é considerado aleatório, ou seja, os parâmetros de entrada estão sujeitas a incertezas, o objetivo é determinar a variação dos parâmetros de saída, dadas as incertezas iniciais. Neste trabalho utilizou-se uma carga pontual variável no cubo do aerogerador como fonte de carregamento. Será utilizado o método Monte Carlo como o método de análise probabilística. A partir da análise dos resultados, espera-se conhecer as distribuições de probabilidade para parâmetros dos materiais, tensões, deslocamentos e cargas internas sobre a estrutura.

**Palavras-chave:** Turbinas Eólicas, Incertezas, Método Monte Carlo

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia tem permitido aos fabricantes de turbinas eólicas, aumentar a eficiência e reduzir os custos dos equipamentos projetados através de conceitos teóricos e de dados experimentais.

A utilização cada vez maior de turbinas e parques eólicos integrados aos sistemas elétricos, com potências cada vez maiores, origina problemas de planejamento de longo prazo, problemas operacionais de controle e, principalmente, de desempenho do sistema e qualidade da energia gerada. Estas características são fortemente afetadas pelo comportamento dinâmico da turbina eólica e pelo comportamento aleatório do vento. Os carregamentos atuantes numa turbina eólica, bem como sua geração anual de energia encontram-se diretamente ligados às características do vento incidente na máquina. Isto se dá porque as flutuações do vento constituem um fenômeno estocástico que pode ser representado por métodos estatísticos, isto é, os ventos que atingirão as pás de um aerogerador cuja energia será utilizada, são fenômenos aleatórios que dependem da localidade, da estrutura do local, dentre outros fatores. Em termos de análise estatística, o regime de vento em um determinado local é representado por funções de distribuição obtidas de medições efetuadas em um determinado período.

Nesse sentido torna-se necessário o desenvolvimento de projetos de turbinas eólicas que levem em consideração as características do regime de vento, bem como a identificação de seus efeitos nestes projetos.

O objetivo principal deste trabalho é propor um modelo computacional que represente o comportamento estrutural de uma turbina eólica para quantificar as variações da geração de energia e dos carregamentos atuantes, turbina essa operando em regimes de vento que apresentam a distribuição de ocorrência variável. Para isso é necessário analisar os carregamentos atuantes em sua estrutura, provocados pela aleatoriedade do vento, através de um modelo de elementos finitos, para então avaliar o comportamento do sistema.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Energia Eólica

A variabilidade do vento é uma das características que mais chama atenção no recurso eólico. O vento é altamente variável, tanto geograficamente quanto temporalmente. Devido a esse aspecto, a estimativa da geração anual de energia de uma turbina eólica é comumente realizada utilizando cálculos que levam em consideração a curva de potência e a distribuição de frequência da velocidade do vento de uma determinada região. Os valores da velocidade média e da densidade de potência média do vento constituem as duas principais grandezas a serem utilizadas na avaliação do potencial eólico de uma região. Com esses valores é possível aperfeiçoar o gerenciamento do funcionamento de parques eólicos podendo avaliar qual o período de maior ou menor intensidade de ventos.

Segundo Burton et al (2001) a distribuição de velocidades pode ser descrita por uma função densidade de probabilidade empírica (função empírica) que descreva a probabilidade da velocidade do vento ser igual a um determinado valor. Esta função está ligada diretamente ao comportamento do vento e deve ser levada em conta. A probabilidade de ocorrência do vento é geralmente representada pela função estatística de Weibull, uma função densidade de probabilidade.

A distribuição estatística de Weibull também é importante para realizar uma estimativa da geração anual de energia de uma turbina eólica. Essa geração anual de energia, bem como os carregamentos atuantes numa turbina eólica, encontra-se diretamente ligados às características do vento incidente na máquina.

Billinton e Chodhury (1992) apresentaram alguns modelos probabilísticos para geração eólica que incorporam o efeito da incerteza do vento. Foi feito um estudo sobre a influência desta geração operando em paralelo com gerações convencionais.

Shokrieh e Rafiee (2005) utilizaram uma abordagem estocástica para desenvolver um código de computador para simular o fluxo de vento, respeitando a aleatoriedade da sua natureza sobre a pá. Fenômenos esses, desprezados em sua grande maioria. Essas simulações incluíram além dos efeitos estocásticos da velocidade dos ventos, as considerações sobre desgastes causados pelo acionamento de freios, força centrífuga, efeitos térmicos entre outros fatores a fim de promover resultados mais condizentes com a realidade. Uma vez que o fluxo do vento (carregamento) é aleatório, os autores utilizaram a distribuição de Weibull para ponderar a carga de vento pela taxa de sua ocorrência.

Em seu trabalho de mestrado Lemos (2005) quantificou as variações da geração de energia e dos carregamentos extremos e de fadiga atuantes em uma turbina eólica operando em regimes de vento que apresentam a distribuição de ocorrência da velocidade com grande concentração em torno de sua média, característica comumente encontrada na região Nordeste do Brasil. Lemos (2005) utilizou a função estatística de Weibull para realizar a modelagem da distribuição de ocorrência da velocidade do vento.

### 2.2. Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um método estatístico utilizado em simulações estocásticas como forma de obter aproximações numéricas de funções complexas. Este método tipicamente envolve a geração de observações de alguma distribuição de probabilidades e o uso da amostra obtida para aproximar a função de interesse. As aplicações mais comuns são em computação numérica para avaliar integrais. A ideia do método é escrever a integral que se deseja calcular como um valor esperado. Esse nome é dado devido à famosa roleta de Monte Carlo em Mônaco.

De acordo com Hammersley e Handscom (1964) o Método de Monte Carlo é a parte da matemática experimental que está preocupada com as experiências dos números aleatórios.

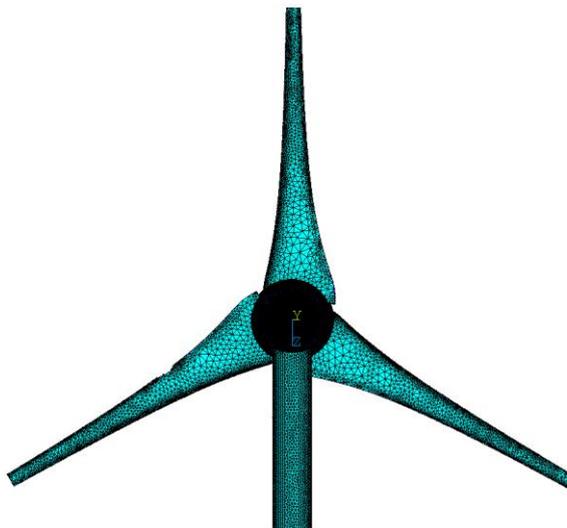
Segundo Escudero (1973), o método consiste na utilização de um modelo probabilístico no lugar do estudo de um processo físico ou matemático. Modelo esse que é capaz de tratar os problemas determinísticos através de amostras aleatórias.

Para resolver então um problema com esse método se faz necessário utilizar uma série de tentativas aleatórias. A precisão do resultado depende do número de tentativas. Escudero (1973) afirma que o Método de Monte Carlo faz o equilíbrio entre a precisão e o tempo computacional.

Billinton, Chen e Chajar (1996) utilizaram o Método de Monte Carlo para modelar o vento de forma cronológica, levando em conta as suas características estocásticas para avaliação da confiabilidade da geração eólica.

## 3. METODOLOGIA

Para geração da malha foi utilizado o software Solid Works e para análise por Elementos Finitos foi utilizado o ANSYS através do Probabilistic Design System (PDS). A figura 1 mostra o resultado obtido.



**Figura 1. Malha do Aerogerador.**

Os parâmetros utilizados para o projeto das pás foram: Perfil NREL S809, com cinco metros de diâmetro e velocidade específica igual a sete. Foram utilizados 79236 elementos do tipo SHELL63 (elementos finitos de casca) com 93726 nós em toda a malha. Elementos finitos de casca podem ser utilizados para a solução de problemas tridimensionais ou bidimensionais complexos onde muitos graus de liberdade estão envolvidos. Os nós localizados na parte inferior da estrutura tiveram todos os seus graus de liberdade restritos e os nós localizados na origem do sistema de coordenadas (que está localizada no centro do cubo) foram submetidos a uma carga variável. Foi utilizada uma distribuição lognormal com um valor médio igual 100N e um desvio padrão de 10% do seu valor médio.

O cálculo da matriz de rigidez de um elemento de casca é feito a partir da combinação das matrizes de rigidez dos elementos de membrana e de placa. Estas matrizes são obtidas a partir da formulação fraca das equações diferenciais que relacionam os deslocamentos nas direções x e y (membrana) e z (placa) e as rotações em torno dos eixos x e y (placa) ao longo do domínio.

A equação diferencial que rege o elemento de membrana é obtida a partir da aplicação das relações de equilíbrio de um elemento deformável nas direções x e y:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( c_{11} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( c_{66} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right) = f_x \quad (1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( c_{66} \frac{\partial u_x}{\partial y} + c_{12} \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( c_{12} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = f_y \quad (2)$$

Onde:

$u_x$  representa o vetor deslocamento na direção x;

$u_y$  representa o vetor deslocamento na direção y;

$f_x$  representa a força de corpo na direção x;

$f_y$  representa a força de corpo na direção y;

$$c_{11} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = c_{22}$$

$$c_{12} = \nu \frac{c_{22}}{E}$$

$$c_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$E$  representa o módulo de Young;

$\nu$  representa o coeficiente de Poisson.

Aplicando o método de Galerkin e realizando a aproximação por elementos finitos, a equação para o cálculo da matriz de rigidez de um elemento de membrana se torna:

$$[K^e] = \int_{\Omega^e} [B]^T [D] [B] d\Omega \quad (3)$$

Onde:

$[K^e]$  representa a matriz de rigidez de membrana.

$[B]$  representa a matriz que guarda as derivadas das funções de forma nas direções x e y. Para um elemento triangular,  $[B]$  pode ser representada por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial H_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial H_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial H_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial H_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial H_3}{\partial y} \\ \frac{\partial H_1}{\partial y} & \frac{\partial H_1}{\partial x} & \frac{\partial H_2}{\partial y} & \frac{\partial H_2}{\partial x} & \frac{\partial H_3}{\partial y} & \frac{\partial H_3}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde:

H representa as funções de forma.

O conjunto de equações diferenciais que regem o elemento de placa é obtido a partir da aplicação das relações de equilíbrio de um elemento deformável nas direções z,  $\theta_x$  e  $\theta_y$ :

$$\frac{D}{2} \left[ (1 - \nu) \nabla^2 \theta_y + (1 + \nu) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] - kGh \left( \theta_y + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{D}{2} \left[ (1 - \nu) \nabla^2 \theta_x + (1 + \nu) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] - kGh \left( \theta_x + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

$$kGh(\nabla^2 w + \phi) + q = 0 \quad (7)$$

Onde:

w representa o deslocamento na direção z;

k representa o fator de correção de cisalhamento;

G representa o módulo de cisalhamento;

h representa a espessura da placa;

q representa a força de corpo aplicada; e

$$\phi = \frac{\partial \theta_y}{\partial x} + \frac{\partial \theta_x}{\partial y} \quad (8)$$

Aplicando o método de Galerkin e realizando a aproximação por elementos finitos, a equação para o cálculo da matriz de rigidez de um elemento de placa espessa é dado por:

$$K = \frac{1}{2} \int_A \kappa^T C_b \kappa \, dA + \frac{1}{2} \int_A \gamma^T C_s \gamma \, dA \quad (9)$$

Onde:

A representa a área do elemento. Os sub-índices sobrescritos b e s representam as contribuições de rigidez devidas respectivamente à flexão e ao cisalhamento. C representa a matriz constitutiva, a qual assume as seguintes formas para a flexão e o cisalhamento respectivamente:

$$C^b = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C^s = \frac{Ehk}{2(1 + \nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\kappa$  representa a matriz que contém as derivadas das funções de forma relativas à flexão, a qual tem a forma:

$$\kappa = \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ -\frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial y} - \frac{\partial \beta_y}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\gamma$  representa a matriz que contém as derivadas das funções de forma relativas ao cisalhamento, a qual tem a forma:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} + \beta_x \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta_y \end{bmatrix} \quad (13)$$

Um elemento de casca pode se deformar em todas as direções, assim a matriz de rigidez deste elemento deve incluir a rigidez na direção  $\theta_z$ . A matriz de rigidez do elemento de casca toma a seguinte forma:

$$k_c = \begin{bmatrix} k_m & 0 & 0 \\ 0 & k_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

$k_c$  representa a matriz de rigidez do elemento de casca.

$k_m$  representa a matriz de rigidez de membrana.

$k_p$  representa a matriz de rigidez de placa.

Cada elemento  $k_p$  e  $k_m$  da matriz  $k_c$  representa respectivamente as matrizes de rigidez de placa e de membrana. Os zeros na última linha e coluna da matriz representam a rigidez na direção  $\theta_z$ .

O ANSYS, através do PDS resolve estas equações diferenciais em cada elemento, levando em consideração que os parâmetros de entrada estão sujeito a incertezas. O carregamento atuante na turbina eólica pode variar significativamente, assim como as propriedades do material, devido a sua estrutura interna ou até mesmo por falhas na fabricação. O principal objetivo é determinar a variação dos parâmetros de saída dada a incerteza das propriedades do material e os carregamentos atuantes. Os parâmetros de saída analisados são a deflexão máxima e a tensão máxima.

Em geral, um programa utilizando o PDS, começa com um conjunto de dados de entrada tais como parâmetros geométricos, parâmetros de material, cargas e condições de contorno. O programa gera então alguns dados de saída para o componente analisado, tais como temperaturas, deslocamentos, tensões, deformações, e/ou velocidades. Quase todos os parâmetros de entrada são submetidos a dispersão devido ou a variabilidade natural ou imprecisões durante a fabricação ou operação. Em uma abordagem probabilística, as incertezas sobre o dados de entrada são descritos por funções de distribuição estatística, permitindo-lhe obter respostas mais realistas em sua análise.

Foi criada uma rotina para execução do arquivo para o modelo determinista para, em seguida, especificá-lo como ficheiro de análise para a análise probabilística. Em seguida, foram definidas as variáveis de entrada e saída como parâmetros aleatórios. Foram definidas as propriedades do material e o carregamento como variáveis de entrada aleatória com suas respectivas funções de distribuição. As propriedades do material foram definidas baseadas na precisão de fabricação. Foi utilizado um desvio padrão de 5% para o módulo de elasticidade. Para a força, foi utilizada uma distribuição lognormal com um valor médio igual ao valor nominal e um desvio padrão de 10% do seu valor médio. Foram definidas a deflexão máxima e tensão equivalente máxima na extremidade fixas como os parâmetros de saída.

Em seguida, foi definido o Método Monte Carlo como o método de análise probabilística e foram executadas simulações Monte Carlo probabilística. Após isso realizou-se o pós-processamento estatístico, a leitura e plotagem dos resultados. O número de simulações foi definido em 40 e o número de repetições foi definido como 1 para realizar 40 análises.

#### 4. RESULTADOS

As figuras 2 e 3 trazem o campo de deslocamentos do aerogerador e a distribuição de tensão de Von Misses respectivamente, devido a uma força constante aplicada na origem do sistema de coordenadas que está localizado no cubo da turbina. Como pode-se ver o deslocamento devido a essa carga é diferente em diversos pontos da estrutura com o mínimo valor no ponto onde o aerogerador é restrito e a distribuição de tensão é máxima no engaste.

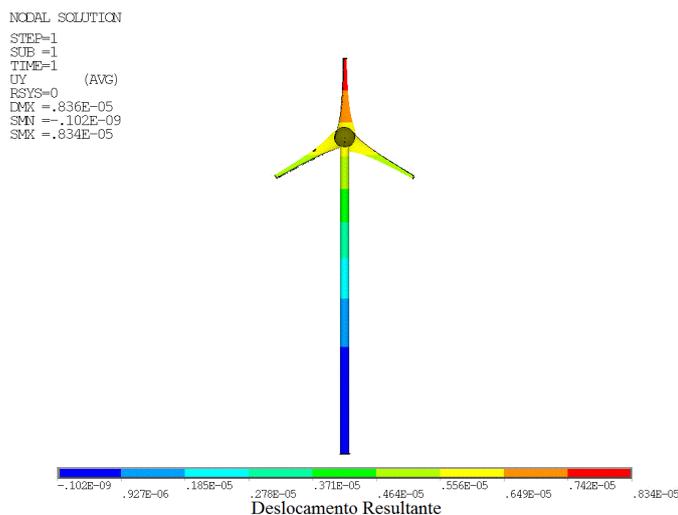
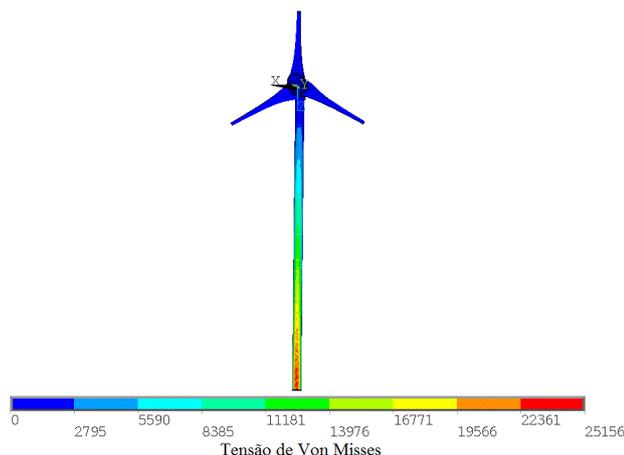


Figura 2. Campo de deslocamento resultante.

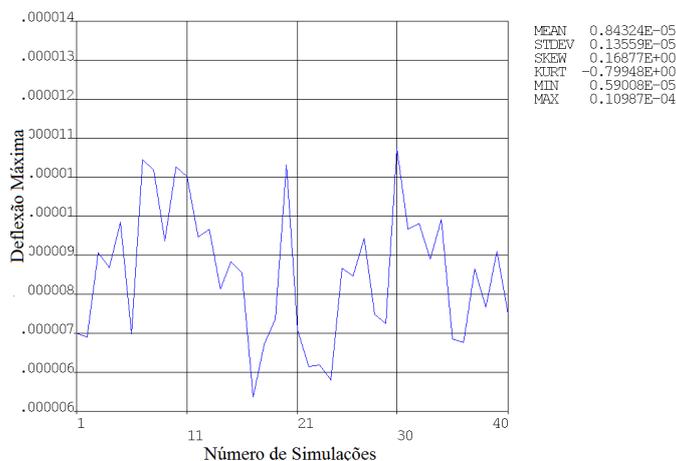


**Figura 3. Tensão de Von Misses.**

O PDS usa os parâmetros de entrada e saída do modelo como variáveis de entrada aleatórias e parâmetros de saída aleatório. Com isso ele pode variar os valores das variáveis de entrada em cada simulação obtendo respostas diferentes em cada ponto do domínio.

Como resultados das simulações foram obtidos diversos gráficos que trazem a resposta do sistema a cargas aleatórias, avaliando-se a deflexão e a tensão no engaste do aerogerador. Nas figuras 4 e 5 pode-se notar os gráficos de máxima deflexão pelo número de simulações. Como pode ser visto na figura 4, a máxima deflexão tem, em seus valores, diversas variações. Este comportamento se dá pelo fato de que este gráfico foi gerado utilizando diversas combinações de pontos durante a simulação, e em cada repetição temos variação do carregamento e das propriedades do material. A figura 5 tem o mesmo objetivo, a única diferença é que agora o gráfico foi gerado utilizando não mais pontos aleatórios, mas sim valores médios da deflexão, continuando com a variação do carregamento e das características do material. Como pode ser visto temos três curvas, valores máximos e mínimos nos extremos e os valores médios ao centro. Com esses resultados podemos ver os limites deste parâmetro viabilizando melhorias ao modelo estrutural, e evitando danos à estrutura.

Nas figuras 6 e 7 tem-se o gráfico do valor médio para a tensão máxima. Na figura 6 apresentam-se as variações da tensão máxima para diversos pontos. Na figura 7 as curvas para os valores médios, máximos e mínimos da tensão são apresentados. Como pode-se ver nas duas figuras, as variações de tensão têm amplitude maior do que as variações de deflexão, o que traz uma maior probabilidade a fadiga da estrutura, fazendo com que esta tenha a sua vida útil diminuída.



**Figura 4. Valor médio para deflexão máxima utilizando amostras.**

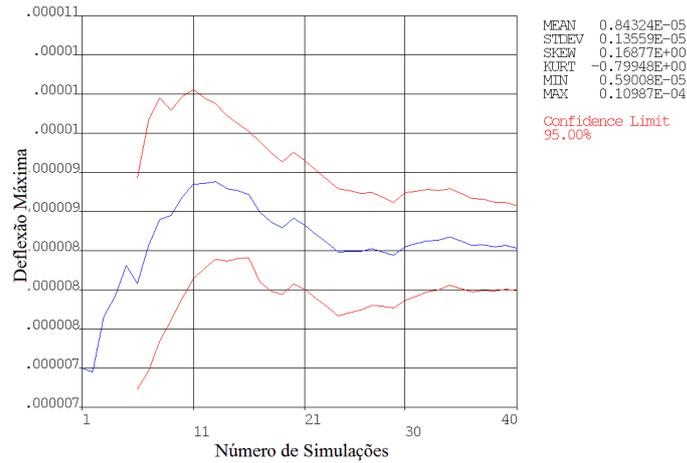


Figura 5. Valor médio para deflexão máxima utilizando valores médios.

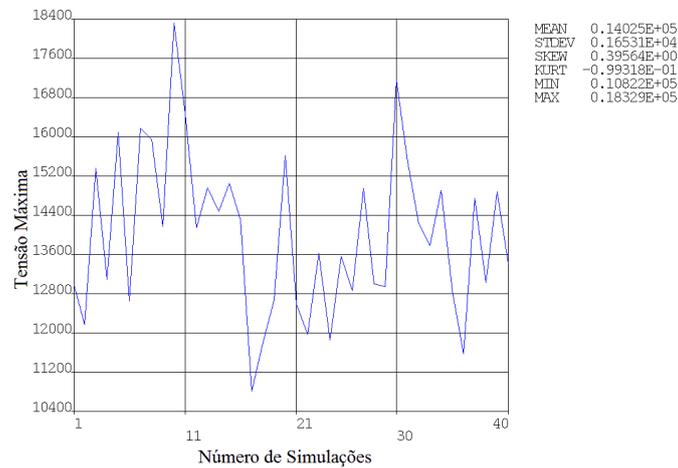


Figura 6. Valor médio para tensão máxima utilizando amostras.

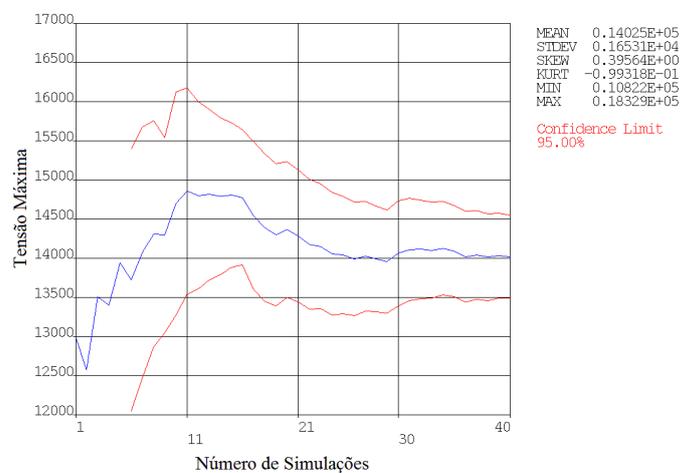


Figura 7. Valor médio para tensão máxima utilizando valores médios.

## 5. CONCLUSÕES

Com base no exposto, para a criação de um projeto de geração eólica, é fundamental a realização de medições criteriosas do potencial eólico em longo prazo, em locais onde serão instaladas turbinas eólicas. A partir dos dados levantados destas medições, devem-se desenvolver estudos que diminuam a incerteza dos valores encontrados na teoria.

Os carregamentos que atuam em uma turbina contribuem para a fadiga na sua estrutura, de natureza aleatória, podem provocar sérios danos ao projeto, caso haja uma grande variabilidade nas distribuições de velocidade do vento. Com isso, as turbinas eólicas instaladas nos mais diversos locais podem vir a falhar por fadiga antes de alcançar o tempo previsto para sua vida útil.

Desta forma, recomenda-se que a instalação de aerogeradores seja realizada após as análises estruturais utilizando métodos probabilísticos levando em conta a aleatoriedade das condições de vento do local onde esta será instalada.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro.

## 7. REFERÊNCIAS

- Billinton, R., Chodhury, A.A. Incorporation of wind energy conversion systems in conventional generating capacity adequacy assessment. IEEE Proceeding C, v.139, n.1, p. 47-56, Jan 1992.
- Billinton, R.; Chen, H.; Chajar, R. A Sequential Simulation Technique for Adequacy Evaluation of Generating Systems Including Wind Energy, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 11, n. 4, p. 728-734, Dez 1996.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, "Wind Energy Handbook", Ed. John Wiley, England, 643 p.
- Escudero, L.F., 1973, La Simulación en la empresa, Barraincúa, Deusto.
- Hammersley, J.M., and Hanscomb, D.C., 1964, Monte Carlo methods, London, Methuen.
- Lemos, D. F. do A. Análise de projeto de turbina eólica de grande porte para as condições climáticas da Região Nordeste do Brasil. 2005. 92 f. Dissertação. (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- Shokrieh, M. M.; Rafiee, R. Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade. Composite Structures, [s. L.], p.332-342, Jun 2005.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## EVALUATION OF WIND TURBINES USING MONTE CARLO STOCHASTIC SIMULATIONS

Francisco de Assis Leandro Filho, fco07leandro@gmail.com<sup>1</sup>

Francisco Ilson da Silva Junior, ilson@ufc.br<sup>1</sup>

Orion Lima Duarte Junior, orionduarte@hotmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, mestrado@posmec.ufc.br,

### Code

CONEM2012-0367

**Abstract.** *The structural evaluation of wind turbines is an issue that depends on variables such as wind patterns, type and dimensions of the wind turbine as well as uncertainties related to these factors. To enter the uncertainties encountered in the evaluation of wind turbines, it is necessary to establish probability distributions for the physical parameters of the medium. In this paper we propose a probabilistic structural analysis using finite element method for stochastic modeling of the uncertainties associated with wind power generation. Is evaluated in response to loads random structure, to a stability analysis of the system. With this purpose we developed a finite element model with the commercial program ANSYS able to faithfully reproduce the behavior of the tower subjected to wind loads produced by wind. Once the load is considered random, ie the input parameters are subject to uncertainties, the goal is to determine the variation of output parameters, given the initial uncertainty. This work used a point load variaável the hub of the turbine as a source of charging. It will be used the Monte Carlo method and the method of probabilistic analysis. From the analysis of the results, it is expected to know the probability distributions for parameters of materials, stresses, displacements and internal loads on the structure.*

**Keywords:** *Wind Turbines, Uncertainties, Monte Carlo Method*

The authors are solely responsible for the content of the printed material included in their work.