

ANÁLISE ESTRUTURAL DE PÁ DE ROTOR EÓLICO PARA APLICAÇÃO EM SALINÓPOLIS-PA

Javier Salvador Ribeiro Ferreira, javiersrf@gmail.com¹

Sérgio De Souza Custódio Filho, engsergiocustodio@gmail.com^{1,2}

Kelvin Alves Pinheiro, kelvin_alves@hotmail.com^{1,2}

Alexandre Mesquita, alexmesq@ufpa.br^{1,2}

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém,

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil

Resumo: A utilização de energia eólica para a geração de energia elétrica vem se estabelecendo cada vez mais no cenário mundial. No Brasil já existem parques eólicos estabelecidos, mas há ainda o grande potencial de novas instalações, principalmente nas regiões costeiras do País. Este trabalho apresenta a análise estrutural do dimensionamento de um pequeno rotor eólico adequado a uma região localizada no nordeste do Estado do Pará, na cidade de Salinópolis. Neste estudo, foi desenvolvido um modelo em elementos finitos para a pá do rotor eólico e foram realizadas análise de resposta a forças aerodinâmicas e análise modal. Os esforços gerados pelo vento foram obtidos utilizando a teoria do elemento de pá (BET) e o método dos painéis para o cálculo de coeficientes aerodinâmicos.

Palavras-chave: Análise Estrutural, Turbina Eólica, Pá, Elementos Finitos, Teoria do elemento de Pá.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um rotor eólico envolve a análise aerodinâmica, onde o rotor é dimensionado para operar de forma eficiente de acordo com as condições de vento e envolve a análise da resistência estrutural aos carregamentos aplicados.

Este trabalho trata da segunda etapa do dimensionamento de um rotor, cujo dimensionamento aerodinâmico está apresentado em [1]. O rotor eólico foi dimensionado às condições de vento na cidade de Salinópolis, localizada no litoral do Estado do Pará. A análise estrutural foi desenvolvida usando a teoria do elemento de pá (blade element theory - BET) [2], para a determinação das forças aerodinâmicas. Em seguida, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos da pá no qual foram aplicadas as forças encontradas na etapa anterior. As respostas às forças aerodinâmicas e as tensões geradas foram determinadas e comparadas com os níveis de tensões admissíveis do material da pá. Adicionalmente uma análise modal foi realizada onde as frequências naturais da pá são determinadas pelo método dos elementos finitos para verificação da possibilidade da ocorrência de altos níveis de vibração em decorrência da ressonância, ou seja, no caso de frequências naturais possuírem valores dentro da faixa operacional da turbina eólica.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho é uma continuação do trabalho apresentado por Custódio Filho et al [1] no qual é apresentado o dimensionamento do rotor para uma turbina eólica adequada ao regime de vento na cidade de Salinópolis-PA. Aqui apresenta-se os resultados da análise de resistência da pá aos esforços aerodinâmicos gerados, assim como a realização de uma análise modal onde são encontrados os parâmetros modais das pás do rotor. Quando o objeto de estudo possui uma geometria e condições de contorno complexas, torna-se necessário discretizar o domínio e utilizar o método dos elementos finitos (MEF) para que seja possível encontrar a solução aproximada do problema que é governado por equações diferenciais parciais. Para análise do comportamento da pá de turbina eólica, submetida a esforços combinados devidos a: carregamento hidrodinâmico; e peso próprio, foi utilizada a versão acadêmica do software comercial de elementos finitos Ansys Mechanical APDL 18.1. As subseções a seguir descrevem os procedimentos mais importantes adotados nas simulações numéricas utilizando a série NACA653618[3] e seus 20 perfis como mostrado na figura 1:

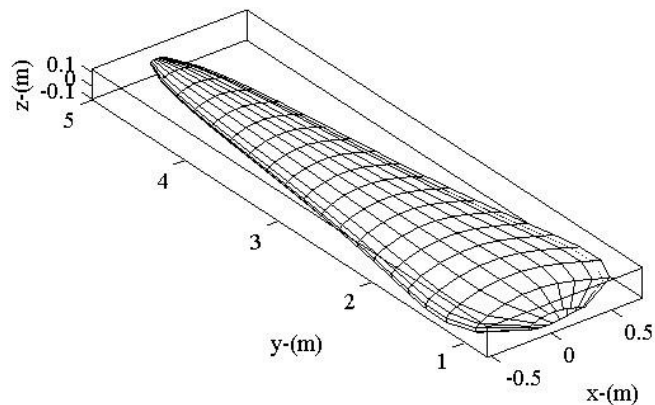


Figura1: representação da pá seguindo o modelo adotado.

2.1. Modelo Geométrico

O método BET foi implementado em ambiente MATLAB, e o algoritmo gerado identifica o perfil desejado pelo usuário, realizando cálculos numéricos para a montagem e plotagem de uma pá. Cada seção da pá foi modelada por 20 keypoints [3]. De posse desses perfis, tornou-se necessário desenvolver um trecho para o alívio de tensões na raiz da pá. Dessa forma, foram inseridos nessa região 2 perfis de transição que são, cada um deles, formados por uma elipse de raios ajustáveis pela preferência do usuário: 0,13m o maior e 0,05 o menor. A figura 2 apresenta as seções da pá descritas por keypoints.

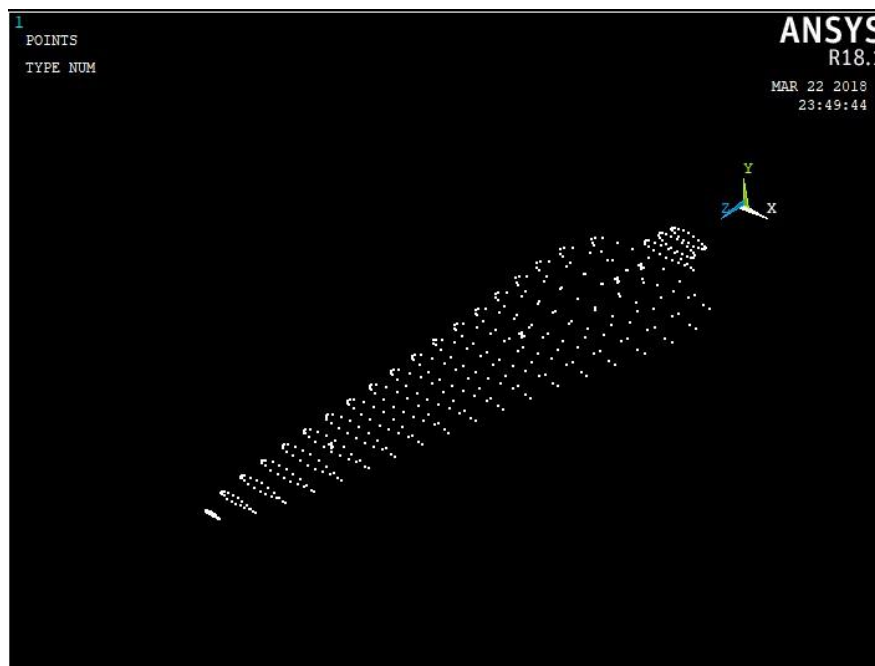


Figura 2: Seções da pá descritas por keypoints.

Após a descrição dos perfis por *keypoints*, criou-se *splines* para ligar os mesmos em cada e entre as seções, com mostrado na figura 3.

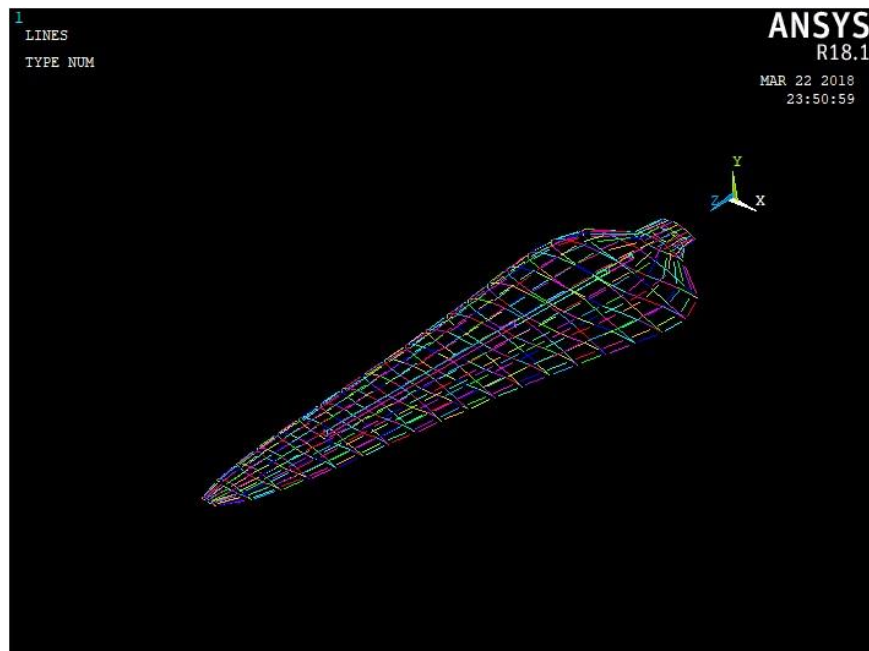


Figura3: Splines ligando os keypoints das seções da pá.

A pá é formada por uma casca composta pelo conjunto de áreas que envolvem a pá. Cada área é limitada pelas linhas (*splines*) distribuídas pelos perfis formando o conjunto de retângulos, como demonstra a figura 4.

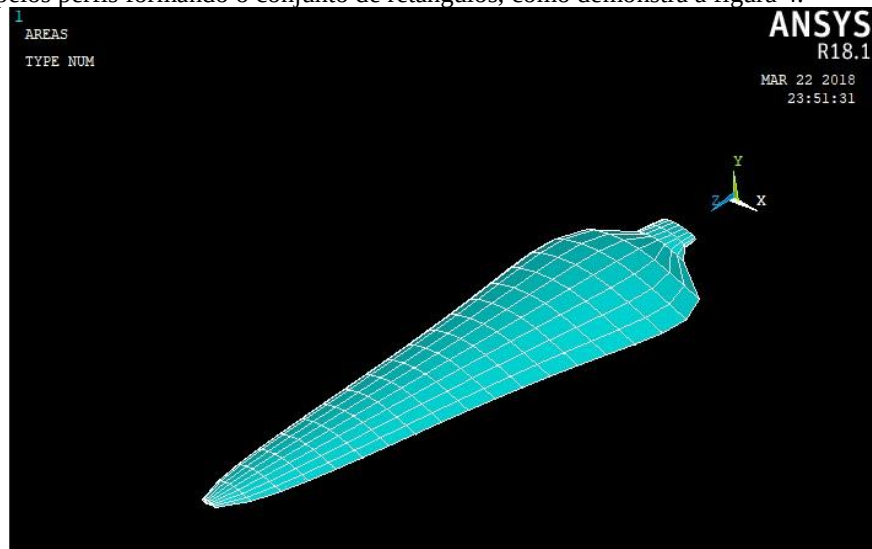


Figura 4: conjunto de áreas que compõe a pá.

Com a finalidade de obter melhor rigidez estrutural, reduzir os esforços sobre a casca e facilitar a fabricação das pás, implementou-se um conjunto de elementos internos à pá (figura 5), compostos de 1 longarina e 6 nervuras, sendo cada nervura formada pela área de seu respectivo perfil.

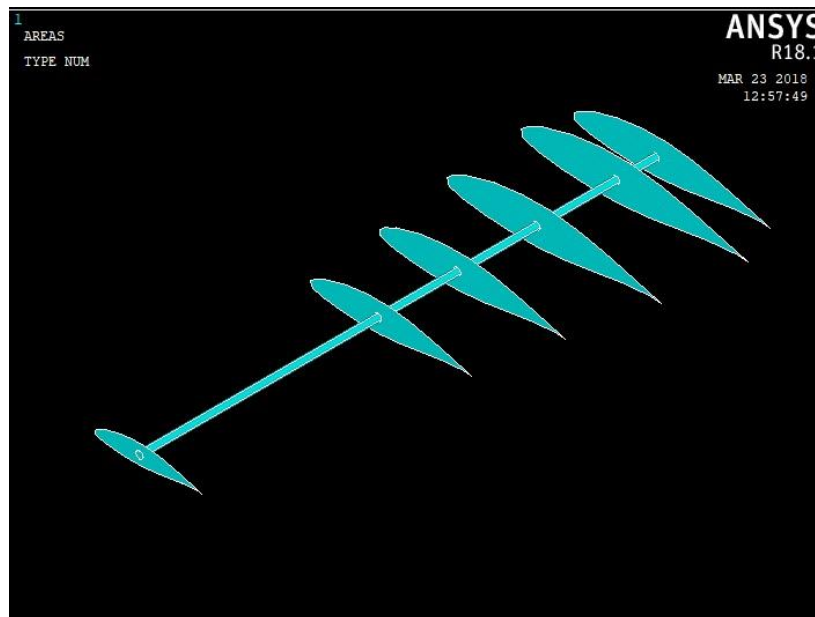


Figura 5: elementos internos à pá

2.2. Elemento e material adotado

O elemento utilizado para as simulações da pá no *Ansys* foi o SHELL281. O mesmo, é um elemento bidimensional, apropriado para análises de estruturas não maciças (elementos de casca) tendo as mesmas, estruturas finas ou moderadamente grossas. O elemento possui oito nós com seis graus de liberdade em cada nó: traduções nos eixos x, y e z e rotações em torno dos eixos x, y e z [4]. O SHELL281 é bem adequado para aplicações lineares, de grande rotação e / ou de grande tensão não linear.

Para material, foi adotado a composição por um material metálico (presente no projeto original). A liga de alumínio escolhida para a simulação foi a mesma utilizada no artigo publicado por [5]. As propriedades da liga composta por Alumínio, magnésio e silício estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA6061-T6 envelhecida [6].

Propriedades da Liga	AA6061-T6 (envelhecida)
Tensão de escoamento (MPa)	276
Tensão de ruptura (MPa)	310
Limite de fadiga (MPa)	96,5
Deformação de ruptura, %	17
Módulo de elasticidade (GPa)	68,9
Coefficiente de Poisson	0,33
Densidade (g/cm ³)	2,7

Essa liga apresenta boa soldabilidade, alta resistência mecânica, fácil acesso no mercado e ótima resistência à corrosão [6].

3. Resultados

Com o perfil NACA653618[3], foram realizados dois tipos de análises, *Modal* e *Estática*. Para a primeira, escolheu-se o método *Block Lanczos* [7] por ser um dos mais usados e por melhor resolução da análise e o intervalo de frequência adotado foi entre 1 e 1000 (Hz). Os resultados obtidos são mostrados na tabela 2.

Tabela 2: Frequências naturais da pá

Modo	Frequência (Hz)
1°	50,297
2°	111,27

Os valores mostram que as frequências naturais da pá estão acima da faixa de rotação operacional da turbina (6 rpm $\sim 0,1$ Hz), afastando assim a possibilidade de ocorrência de altos níveis de vibração em decorrência da ressonância.

Para a análise estática, foi usado as seguintes propriedades, apresentadas na tabela 3, para o escoamento do fluido no ambiente de simulação XFOIL.

Tabela 3: Propriedades do escoamento

Propriedade	Valor
Velocidade do fluido Máx – m/s	8
Densidade – Kg/m ³	1.205
Viscosidade cinética – m ² /s	15.111e-6
Ângulo de ataque	10°
Coeficiente de arrasto	0.01
Coeficiente de sustentação	1.0
Velocidade de rotação – rads/s	26.17

Seguindo essas propriedades, através do xfoil foram calculadas um conjunto de forças resultantes atuando na pá e as mesmas foram inseridas na simulação ANSYS para análise estática. Para validação do tamanho relativo de elemento usado na malha (quantidade de elementos geradas por cada linha), realizou-se posteriormente o teste de convergência presente no gráfico 1 com as deformações máximas e o tamanho do elemento.

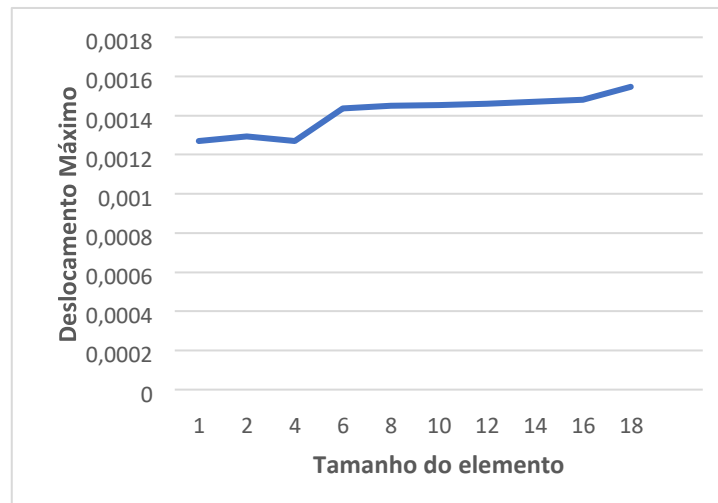


Figura 6: Teste de convergência da malha usando o deslocamento

Após o teste de convergência e utilizando o intervalo de maior convergência (6 a 12), temos como resultado as tensões máximas apresentadas na tabela 4, utilizando o Critério de falha de Von Mises [8].

Tabela 4: Resultado da análise estática.

Tamanho relativo do elemento	Tensão Máx (MPa)
6	63.5
8	74.7
10	63.7
12	71.3

Então, a máxima tensão desenvolvida na pá gira em torno de 60 e 75 Mpa (para o tamanho de elemento adotado), um valor bem abaixo da tensão admissível do material da pá, que tem como Tensão de ruptura 310 MPa e Tensão de escoamento 276 MPa [6].

4. Conclusão

O trabalho apresentou uma análise de resistência de uma pá de um pequeno rotor eólico dimensionado para o regime de vento na região de Salinópolis, no litoral do Estado do Pará. A análise estrutural foi desenvolvida usando a teoria do

elemento de pá e o método dos elementos finitos. Como resultado obteve-se que as tensões desenvolvidas em decorrência dos carregamentos aerodinâmicos são bem abaixo da tensão admissível do material da pá. Também foi feita uma análise modal por elementos finitos para a verificação da possibilidade de ocorrência de ressonância. Verificou-se que as frequências naturais estão bem acima da faixa operacional, o que afasta essa possibilidade de ocorrência.

5. REFERÊNCIAS

- [1] CUSTÓDIO FILHO, S. S; LIMA, L.C.; PINHEIRO, K.A., SERRÃO, A.C.S.; FERREIRA, J.S.R; VAZ, J.R.P; MESQUITA, A.L.A. Dimensionamento de Rotor Eólico para Aplicação em Salinópolis-PA. X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, BA, 2018.
- [2] SØRENSEN J.N. Blade-Element/Momentum Theory. In: General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbines. Research Topics in Wind Energy, vol 4. Springer, 2016.
- [3] AIRFOIL Tools. NACA 4 digit airfoil specification. Disponível em: <
<http://www.airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- [4] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SHELL281.html
- [5] FERREIRA, G. V. (2014). Análise do Comportamento Mecânico de uma Pá Compósita Usada em Turbinas Hidrocinéticas. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM - 227/2014, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87p.
- [6] CALLISTER Jr., William D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma introdução. 8. ed. São Paulo, Brasil: LTC, 2012
- [7] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_per/perblocklancz.html
- [8] VON M. R. (1913). Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. Göttin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, pp. 582–592

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STRUCTURAL ANALYSIS OF WIND ROTOR BLADE FOR APPLICATION IN SALINÓPOLIS-PA

Javier Salvador Ribeiro Ferreira, javiersrf@gmail.com¹

Sérgio De Souza Custódio Filho, engsergiocustodio@gmail.com^{1,2}

Kelvin Alves Pinheiro, kelvin_alves@hotmail.com^{1,2}

Alexandre Mesquita, alexmesq@ufpa.br^{1,2}

¹Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal do Pará, Belém,

²Postgraduate course of Mechanical Engineering, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil

Abstract. *The use of wind energy for electric power generation is becoming more and more established in the world scenario. In Brazil there are already established wind farms, but there is still great potential for new facilities, especially in the coastal regions of the country. This work presents the structural analysis of the design of a small wind rotor suitable for a region located in the northeast of the State of Pará, in the city of Salinópolis. In this study, a finite element model was developed for the wind turbine blade and aerodynamic forces response analysis and modal analysis were performed. The wind-generated efforts were obtained using the blade element theory (BET) and the panels method for calculating aerodynamic coefficients.*

Keywords: *Structural analysis, Wind Turbine, Blade, Finite Elements, Blade Element Theory.*