

MODELAGEM EM TRÊS DIMENSÕES (3D) E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM ANÁLISE DE FALHAS PARA TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE FEITA EM MATERIAL COMPÓSITO

Julio C. P. Pires^a, Branca F. de Oliveira^b

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha, 99/408 Porto Alegre/RS, Brasil

^a*pires.julio@terra.com.br*

^b*branca@ufrgs.br*

Palavras-chave: Energia eólica, Simulação computacional, Elementos finitos, Modelagem geométrica.

Resumo. Este artigo apresenta um estudo para aerogerador de pequeno porte projetado inicialmente para uso residencial. A ênfase está na modelagem e simulação virtual da estrutura das pás em compósito de fibra de vidro. A modelagem foi feita com software para desenho assistido por computador (CAD 3D). Para tanto, foi escolhido o perfil MH110 que apresenta boa relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto e facilidade de fabricação. Os parâmetros como o diâmetro, a corda e a torção da pá, as relações entre velocidades e a aplicação de cargas na estrutura do material utilizado foram definidos segundo bibliografia específica, software para análise de perfil aerodinâmico e simulações pelo método dos elementos finitos. Procurou-se buscar sempre a maior eficiência, segurança e economia. O material foi projetado para resistir às tensões decorrentes de operação em condições consideradas normais e para rajadas de vento. A simulação pelo método dos elementos finitos foi conduzida com ferramenta computacional e levou em conta os limites de falha do material utilizado. A geometria simulada apresentou baixo deslocamento quando submetida às cargas aerodinâmicas de empuxo e rotacional. Ao realizar simulação com critério de falha, foi possível determinar a espessura mais adequada para o material compósito e verificar seu comportamento de acordo com diferentes velocidades de vento.

1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica através da força eólica inicia-se somente por volta do século XX. (Tolmasquim, 2003). Com o crescimento da economia mundial, veio o aumento significativo do consumo de eletricidade.

Atualmente a produção de energia eólica é visada muito por tratar-se de uma fonte não poluente e teoricamente inesgotável e também pelo apelo ecológico que se faz necessário diante de algumas circunstâncias.

Segundo o GWEC – “Global Wind Energy Council” (Conselho Global de Energia Eólica) (GWEC, 2010) existe atualmente mais de 30.000 turbinas eólicas em operação no mundo, totalizando mais de 158 mil MW de capacidade instalada cumulativamente de 1996 a 2009.

A energia retirada do vento para transformação em eletricidade requer um aparelho de interação com um fluxo de vento. Aerogeradores são máquinas intermediárias feitas para captação do vento e posterior transformação em energia elétrica.

O rotor eólico é formado por um conjunto de peças sólidas feitas para permitir uma quantidade de giro considerada ótima para transferir a um gerador elétrico. A transferência de giro é feita por um eixo e, em alguns casos, aumentada com auxílio de um conjunto de engrenagens.

As pás, que fazem parte desse conjunto de peças, são os elementos que entram em contato direto com a massa de ar em movimento. O momento de interação das pás com o vento se dá quando acontece transferência de energia cinética do fluxo para superfície da pá.

O desenho das pás é feito a fim de maximizar essa transferência de energia e transformar uma quantidade possível significativa em energia elétrica.

Diversas variáveis estão presentes quando se determina uma geometria onde se pretende obter comportamento controlado em contato com um fluido. Segundo Burton *et al* (2001) para obter-se um desenho eficiente das pás, alguns objetivos devem ser satisfeitos:

- Maximizar a produção de energia para uma distribuição específica de vento;
- Procurar o limite de potência máxima;
- Resistência as cargas inerentes ao objeto e à possível fadiga que ocorrerá;
- Restringir a tendência de movimento da ponta da pá em direção à torre;
- Evitar ressonâncias;
- Minimizar peso e custo.

Aerogeradores em geral têm em sua vida útil quantidade de ciclos de trabalho onde cargas aerodinâmicas são determinantes. Segundo Epaarachchi e Clausen (2006), antes da realização do projeto de qualquer nova pá, deve-se levar em conta seu projeto estrutural para garantir que a pá suporte todas as cargas de serviço.

As pás de turbina eólica são projetadas e construídas com expectativa de resistir por uma faixa de 20 a 30 anos em operação (Shokrieh e Rafiee, 2006). Trincas, rachaduras e desgastes em locais específicos devido aos ciclos de uso podem reduzir consideravelmente este tempo de vida do material. Ainda conforme Shokrieh e Rafiee (2006), atualmente as pás são feitas em materiais compósitos, pois estes podem satisfazer projetos complexos, possuem baixo peso e boas propriedades de rigidez.

Os compósitos geralmente são utilizados como camadas para formar placas, cascas ou outros elementos onde prevaleçam sempre duas dimensões. Dessa forma é possível fabricar peças em compósitos, por exemplo, empregando diferentes camadas com diferentes direções

para as fibras. Essas direções são definidas de acordo com alguns requisitos de projeto tais como: dimensões das peças (espessura principalmente), direção da solicitação de tração no material, direção da força cisalhante predominante no uso da peça. (Neto e Pardini, 2006).

A possibilidade de projetar o material de acordo com determinadas necessidades faz com que se empreguem largamente compósitos na indústria de aerogeradores. Nesta pesquisa, as pás simuladas são constituídas de fibra de vidro tipo E, que proporcionam rigidez adequada ao objeto em estudo e possui valor comercial baixo em relação à fibra de vidro tipo S e à fibra de carbono.

O lançamento do anteprojeto descrito neste trabalho leva em conta o baixo custo de fabricação, o alto desempenho e a simplicidade. Segundo Jureczko *et al* (2005), o custo de fabricação das pás de uma turbina eólica está na ordem de 15 a 20% do custo total de produção da turbina. Este fato justifica a realização de pesquisa científica com objetivo de reduzir custos de equipamentos, agregando segurança, e maximizar eficiência em conversão de energia.

A metodologia criada para atingir os objetivos desta pesquisa é apresentada da seguinte forma:

- a. Identificação e situação do tema no contexto relativo às energias;
- b. Realização de pesquisa exploratória, levantamento bibliográfico e/ou de campo para conhecimento do estado da arte sobre aerogeradores;
- c. Realização de modelagem geométrica em três dimensões (3D), aplicando conceitos de aerodinâmica para perfis de pás de turbina eólica, observando a máxima potência que pode ser extraída do vento;
- d. Determinação das forças aerodinâmicas que atuam em pás de aerogeradores;
- e. Realização de análise estrutural com simulação da pá pelo método dos elementos finitos;
- f. Aplicar um critério de falha, na simulação virtual, para materiais compósitos;
- g. Comparar resultados para diversas velocidades de vento e espessuras de camadas.

Neste trabalho foi desenvolvida modelagem geométrica e análise estrutural das pás para aerogerador de pequeno porte. A modelagem tridimensional levou em conta aspectos aerodinâmicos. A análise estrutural foi feita através do método dos elementos finitos. Os resultados mostram o comportamento da pá testada para diferentes espessuras de camada de material e para diferentes velocidades de vento.

2. MODELAGEM DA PÁ

O projeto das pás do rotor deve levar em conta dois aspectos: aerodinâmico e estrutural. Dentro do aspecto aerodinâmico, podem-se listar algumas fases do processo de projeto:

- a. Definição do diâmetro do rotor;
- b. Definição da geometria do perfil aerodinâmico;
- c. Definição dos parâmetros aerodinâmicos (ângulo de passo, velocidades);

d. Definição da geometria do perfil longitudinal da pá (corda e *twist*);

a. Diâmetro do rotor

O rotor é formado pelas partes que permitem a rotação do eixo que transmitirá giro ao gerador. As pás são os principais elementos que formam o rotor. O diâmetro do rotor está diretamente relacionado ao desempenho do aerogerador. A equação (1) mostra a relação da potência retirada do vento com as velocidades anterior e posterior

$$P_{ret} = \rho \frac{A v_1^3}{4} [(1+x)(1-x^2)] \quad (1)$$

sendo ρ , a densidade do ar em kg/m^3 , A , a área da seção transversal onde percorre um fluxo de ar (no caso do rotor eólico, significa a área varrida pelas pás), em m^2 , e $x = \frac{v_3}{v_1}$, onde v_1 é a velocidade do vento anterior às pás, em m/s , v_3 a velocidade posterior as pás, em m/s , e v_2 a velocidade no nível das pás, em m/s .

Nota-se que o valor máximo da potência retirada é encontrado quando $x = \frac{1}{3}$, ou seja, $v_3 = 1/3 v_1$.

Sendo assim, o comprimento da pá, ou diâmetro do rotor, será definido pela potência que se pretende retirar do ar e converter em energia elétrica, pois a única variável que se pode alterar na equação 1, através de projeto, é A (área varrida pelas pás).

b. Geometria do perfil aerodinâmico

Existem diversos aerofólios desenhados para utilização em turbinas eólicas. Porém a maioria destes originou-se de projetos de asas de aeronaves.

Nesta pesquisa foi definido o coeficiente de sustentação C_l , que é a capacidade que um aerofólio tem de sustentar-se em relação a uma velocidade de vento, como principal parâmetro de eficiência do perfil a ser escolhido. O coeficiente de arrasto C_d (resistência aerodinâmica) também foi considerado na análise, pois para o caso de um rotor de pequeno porte é preciso definir a razão adequada entre sustentação e arrasto para controlar a velocidade resultante entre velocidade angular e velocidade do vento.

Segundo Carvalho (2003) existe uma velocidade específica representada na equação (2) por λ . Essa velocidade, que é um número adimensional, é dada pela relação entre a velocidade de rotação na ponta da pá, v_u , em m/s , e a velocidade v do vento, em m/s .

$$\lambda = \frac{v_u}{v} \quad (2)$$

A velocidade de rotação da pá v_u pode ser definida pelo produto da velocidade angular ω da pá, em rad/s , e o raio R desta, em metros, conforme (3).

$$v_u = \omega R \quad (3)$$

Conforme apresenta a figura 1, quanto mais aumenta a velocidade específica λ , mais necessário se torna ter um projeto que potencialize a sustentação (L).

A análise do perfil foi conduzida com auxílio do software JavaFoil, disponível na *web site* do professor Dr. Martin Hepperle, da Universidade de Stuttgart, Alemanha. Esse software foi desenvolvido em linguagem Java e tem sua utilização principal em análises de perfis de asas para modelos de aeronaves. Alguns conceitos de aerodinâmica aplicados para perfis de asas de aviões podem ser aplicados em análise de pás para aerogeradores.

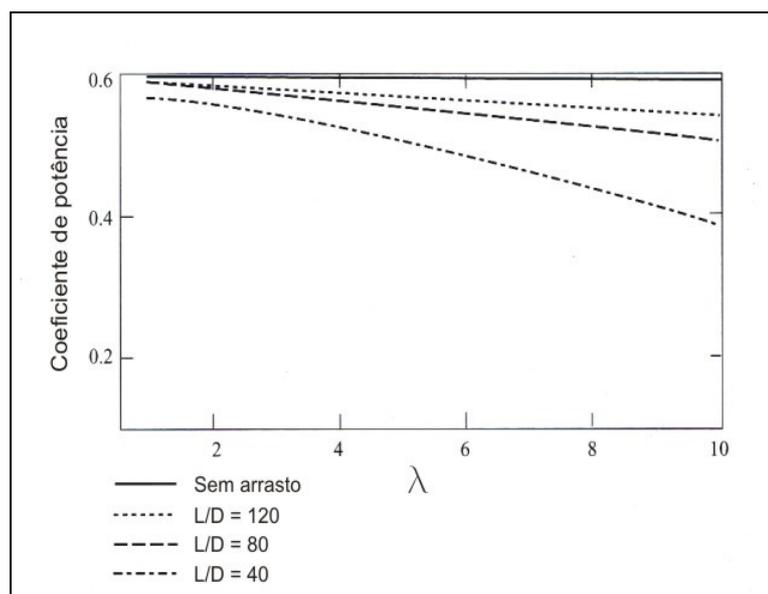


Figura 1 – Sustentação (L) e arrasto (D) em função do coeficiente de potência e velocidade específica λ

Fonte: Burton *et al* (2001)

O perfil inicialmente escolhido foi o MH110, desenvolvido também por Martin Hepperle para pás de aerogeradores de eixo horizontal e com controle tipo *stall* (ângulo de passo fixo). O perfil é desenhado a partir de pontos de coordenadas em duas dimensões (eixos x e y).

Após inserir as coordenadas, é possível visualizar a forma do perfil (fig.2).

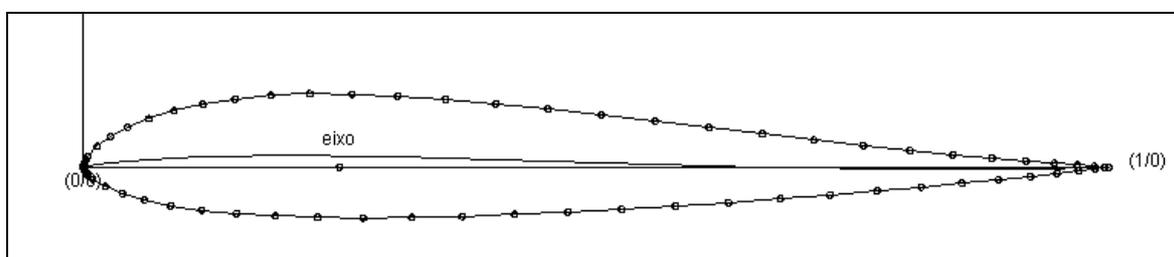


Figura 2 – Forma do perfil aerodinâmico MH110

Com o perfil criado, é possível determinar para qual ângulo de ataque o perfil terá maior sustentação, arrasto e pressão (neste caso, força do vento).

Para análise de asa de aeronave, o ângulo de ataque está diretamente ligado às

variáveis listadas acima, pois a asa de avião está interagindo somente com uma direção de vento, ou seja, o cálculo é feito pelo deslocamento da asa e não pelo deslocamento do fluido (vento).

Já no caso do rotor eólico, existem duas componentes a serem consideradas: o vento e a rotação.

A figura 3 descreve a relação entre velocidades, ângulos e plano de rotação da pá. A velocidade do vento no nível da pá v_2 atua no sistema somando-se geometricamente à velocidade de rotação da ponta da pá v_u , formando a velocidade resultante v_r . O ângulo formado entre a v_r e a corda da representação do perfil da pá é o ângulo de ataque α . O ângulo formado entre o plano de rotação da pá e a corda é o ângulo de passo ϑ . A força de sustentação F_1 é uma força perpendicular à velocidade resultante v_r .

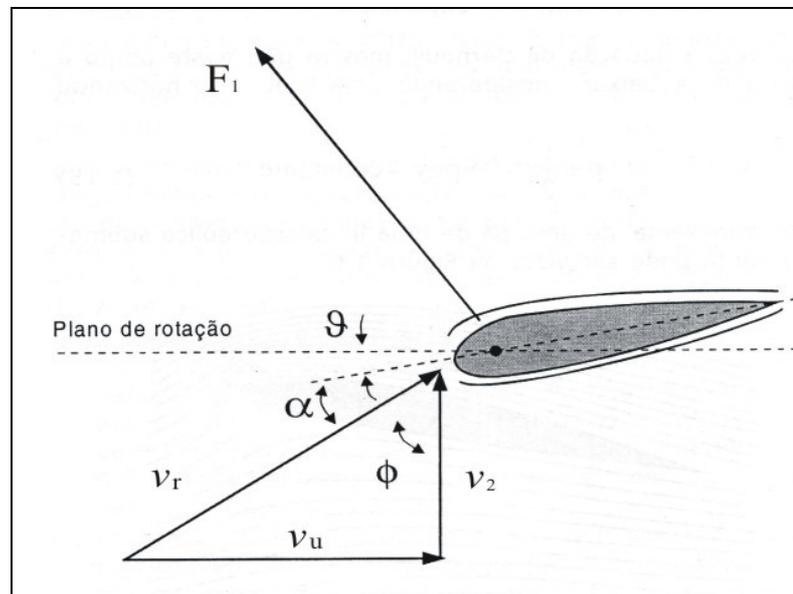


Figura 3 - Relações entre ângulos, força e velocidades em um perfil aerodinâmico
Fonte: Carvalho, 2003

Dessa maneira fica clara a importância da adequação do desenho das pás para se chegar a um ângulo de ataque tal que permita maior sustentação.

c. Parâmetros aerodinâmicos

A partir do perfil MH110 definido, é possível obter resultados de diferentes coeficientes de sustentação para diferentes ângulos de ataque. A tabela 1 apresenta os coeficientes de sustentação e de arrasto para ângulos de ataque de 0 a 10 graus, com incremento de 1 grau.

A tabela 1 mostra que o maior valor de C_l está para ângulo de ataque 10° , entretanto deve ser considerada a relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto (C_l/C_d) que apresenta como resultado o número mais alto, obtendo assim maior sustentação. Por esse motivo, o ângulo de ataque α mais adequado para o perfil em análise é 8° .

α [°]	C_l [-]	C_d [-]	C_l/C_d [-]
0,0	0,017	0,02460	0,6911
1,0	0,103	0,02491	4,1349
2,0	0,223	0,02422	9,2073
3,0	0,343	0,02328	14,7337
4,0	0,462	0,02500	18,4800
5,0	0,581	0,02667	21,7848
6,0	0,676	0,02644	25,5673
7,0	0,769	0,02677	28,7262
8,0	0,856	0,02876	29,7636
9,0	0,923	0,03577	25,8037
10,0	0,977	0,04411	22,1492

Tabela 1 – Parâmetros em função do ângulo de ataque

Considerando que a pá é projetada para uma velocidade de vento pré-determinada, é possível calcular sua velocidade de rotação e conseqüentemente a velocidade resultante. Com a velocidade resultante conhecida, é possível desenhar a pá com ângulo de passo local (que é fixo) tal que permita chegar ao ângulo de ataque desejado, pois o ângulo de ataque pode ser encontrado com a subtração do ângulo formado entre a velocidade resultante v_r e plano de rotação da pá e o ângulo de passo local da pá (ver figura 3).

d. Perfil longitudinal da pá

A geometria do perfil longitudinal da pá varia de acordo com o diâmetro do rotor, com o número de pás, com o coeficiente de sustentação e com a velocidade específica λ .

Segundo Gasch e Twele (2002), existe uma maneira de determinar a corda da pá em função de seu raio local, ou seja, de acordo com a distância relativa do eixo do rotor. A equação (4) define a corda local, em metros, para cada seção r da pá.

$$c(r) = \frac{2\pi R}{n} \frac{8}{9} \frac{1}{C_l \lambda^2} \frac{r}{R} \quad (4)$$

Na Eq. (4), R é o raio do rotor, em metros, n representa o número de pás do rotor, C_l é o coeficiente de sustentação, λ é a velocidade específica e r é o raio local, em metros.

A partir de uma análise rápida dessa equação é possível perceber algumas relações de proporções: quanto maior for o rotor, maior será a corda das pás; a corda reduz com o acréscimo de pás no rotor; o coeficiente de sustentação é inversamente proporcional à corda, logo quanto maior for o coeficiente de sustentação, menor terá de ser a corda da pá. É possível perceber também que quanto maior a velocidade específica λ , menor será a corda; e finalmente pode-se concluir que quanto mais próximo da raiz, maior será a seção transversal da pá.

A pá projetada para essa pesquisa foi seccionada em nove partes para possibilitar sua modelagem utilizando a eq. (4). Assim, para cada raio local foi calculada a corda do perfil transversal.

Resolvendo-se a Eq. (4) para as nove seções da pá, têm-se as medidas de corda como

mostra a Figura 4.

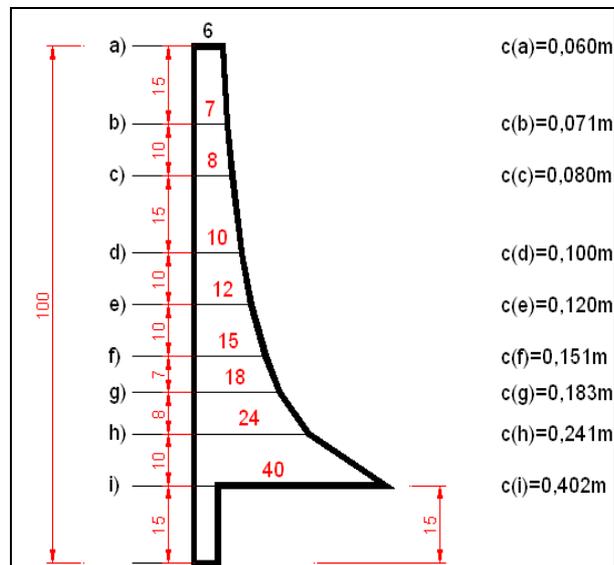


Figura 4: dimensões da corda c da pá para as seções definidas

A figura 4 apresenta um modelo ideal de acordo com conceitos aerodinâmicos para o rotor em estudo. Esse modelo leva em conta maior eficiência na operação do objeto. Entretanto é preciso considerar a pá como produto para fabricação, e como tal, deve possuir dimensões que facilitem esse processo. Isso ajudará também na redução do custo de fabricação.

Ainda segundo Gasch e Twele (2002), a torção da pá β (*twist*), pode ser definida conforme as Eqs. 5 e 6

$$\beta(r) = \gamma(r) + \alpha_A(r) \quad (5)$$

$$\gamma(r) = \arctan\left(\frac{3}{2} \frac{r}{R} \lambda_D\right) \quad (6)$$

onde γ representa o ângulo entre a velocidade resultante do vento (soma geométrica entre a velocidade do vento e a velocidade de rotação da pá) e a velocidade de rotação da pá. E α é o ângulo de ataque, conforme fig. 3.

Entre outros objetivos, a torção da pá permite aumento da força de sustentação que atua na pá. Entretanto conforme se aproxima da ponta, essa torção tende a reduzir e o perfil tende a ter sua corda paralela à velocidade de rotação, que na ponta é maior que a velocidade do vento. Por outro lado, a parte próxima a raiz da pá tende a ter corda maior e torção também maior.

A pá deve ser projetada para proporcionar um escoamento menos turbulento do fluxo de ar com a qual está interagindo. Dessa maneira torna-se necessária uma compatibilização entre a forma resultante dos cálculos de corda e torção e a superfície que se pretende ter. Nota-se que o escoamento junto a esta deve ser bastante laminar e ter o mínimo de turbulência. Para atingir esse objetivo, torna-se necessária uma possível suavização na geometria da pá. Deve

ser levado em conta que esse processo pode proporcionar perdas aerodinâmicas assim como possibilitar o surgimento de regiões com tensões desnecessariamente elevadas na pá. A análise pelo método dos elementos finitos pode contribuir revelando possíveis locais onde elevados esforços podem causar dano à peça.

3. ANÁLISE ESTRUTURAL DAS PÁS

Para realizar a simulação foi utilizado o software de engenharia assistida por computador Abaqus/CAE (*computer-aided engineering*). Segundo Kaminski (2008), o objetivo da análise estrutural pelo método dos elementos finitos é verificar um produto modelando seu comportamento antes mesmo de sua fabricação. O material escolhido para as pás é um material compósito e será considerado como tendo comportamento elástico. As camadas do material podem ser dispostas com diferentes orientações para as fibras. A matriz é epóxi e as fibras são de vidro tipo E. Dessa forma foram consideradas as seguintes propriedades elásticas:

- E_1 - módulo de elasticidade na direção das fibras = 45 GPa;
- E_2 - módulo de elasticidade na direção transversal as fibras = 12 GPa;
- ν_{12} - coeficiente de Poisson = 0,19
- G_{12} - módulo de cisalhamento no plano 1-2 = 5,5 GPa;
- G_{13} - módulo de cisalhamento no plano 1-3 = G_{12} = 5,5 GPa (simplificação)
- G_{23} - módulo de cisalhamento no plano 2-3 = G_{12} = 5,5 GPa (simplificação).

Após estabelecer as propriedades desse material empregado na simulação, foi criada a seção tipo *Shell* homogêneo para a pá em fibra de vidro. Nesse momento foram estabelecidas duas camadas para a pá. As fibras foram dispostas na direção longitudinal da pá.

As cargas que atuam na pá em decorrência da interação com o fluxo de ar são as forças uniformes aerodinâmicas. Assumindo-se que a velocidade aparente v_r (velocidade resultante) seja constante, existe uma distribuição de força na pá quando ela está em operação. Essa distribuição se dá de duas formas: empuxo (Eq. 7) e força rotacional (Eq. 8), onde ρ representa a densidade do ar, considerada $1,29\text{kg/m}^3$ ao nível do mar, c é a corda da pá e dr é a componente que representa a espessura infinitesimal do anel considerado para o cálculo da área de varredura da pá, onde haverá a interação da velocidade rotacional e o vento.

$$dT = \frac{1}{n} \left(\frac{8}{9} \frac{\rho}{2} v_r^2 \right) 2\pi r dr \quad (7)$$

$$dU = \frac{2\pi R}{n\lambda_D} \left(\frac{16}{27} \frac{\rho}{2} v_r^2 \right) dr \quad (8)$$

Existem também forças de rajadas de vento, ocasionando variação na dT e elevada pressão instantânea na pá, entretanto se o empuxo for calculado com a velocidade resultante considerando velocidade de vento elevada e velocidade de rotação também elevada, pode-se

desconsiderar a força devido a rajadas, pois o empuxo já será calculado para o vento máximo.

As forças devido ao giro de direcionamento do rotor para o fluxo, giroscópica e coriolis foram desconsideradas porque esse movimento normalmente é lento relativo à rotação das pás. A inércia devido à frenagem do sistema também foi desconsiderada devido ao rotor não possuir freio mecânico.

Segundo Gasch e Twele (2002), para grandes turbinas, o peso das pás influencia uma carga cíclica. Para rotores com diâmetro igual a 20m, a influência é pouca; para rotores com diâmetro menor de 5m, essa carga é irrelevante.

As velocidades de vento utilizadas nesta pesquisa são 8, 10, 20, 30 e 40m/s. Existem algumas teorias para escolha da velocidade de vento nominal (de serviço) para aerogeradores, no entanto a experiência tem mostrado que a maioria dos aerogeradores trabalha com velocidade nominal de 10m/s. (Habali e Saleh 2000). Apesar de a velocidade do vento variar para cada região, foi delimitada, no presente trabalho, velocidade máxima de 40m/s (equivalente a 144 km/h) para fins de cálculo de cargas aerodinâmicas.

Calculando-se as cargas aerodinâmicas, por exemplo, para uma velocidade de vento de 10m/s, resolvendo-se a Eq. 7 tem-se 36860 N de empuxo total distribuído com variação cúbica, aumentando ao longo do raio da pá. A força rotacional dU foi calculada com a Eq. 8 e entra no sistema com magnitude 8191,22 N com variação quadrática ao longo do raio. A Figura 5 apresenta a pá modelada por uma malha de 4154 elementos triangulares com 2079 nós e mostra resultados de deslocamento para seqüência de laminação com duas camadas, $[0^\circ, 0^\circ]$, cada uma com 0,0018 m de espessura e velocidade de vento de 10 m/s, onde o maior deslocamento é verificado na ponta da pá, com magnitude 0,193m. Sendo o aerogerador proposto neste estudo um protótipo virtual, ainda não fabricado, não se dispõe de resultados experimentais que possam ser comparados aos resultados numéricos obtidos até o momento. No entanto, foram feitos testes de convergência para verificar o refinamento da malha a ser utilizada.

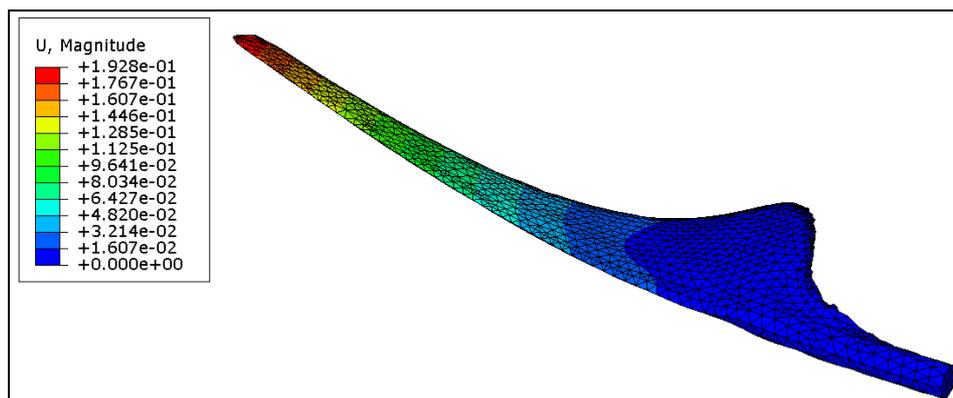


Figura 5: deslocamentos na pá em m

A Figura 6 mostra a distribuição das tensões σ_{11} na pá e comprova que a área mais solicitada está próxima à raiz, ou seja, próximo a parte que é fixada ao eixo.

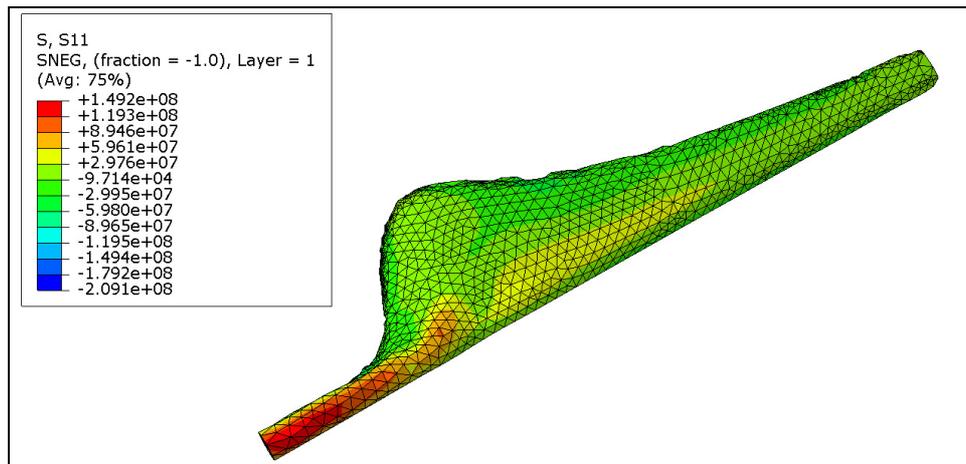


Figura 6: tensões σ_{11} (direção do eixo longitudinal da pá)

Os resultados acima representados por simulações virtuais apresentam uma situação de fabricação e vida útil ideal. Entretanto os materiais compósitos possuem sua resistência máxima, ou resistência de trabalho (propriedades consideradas para cálculos de resistência) reduzida ao longo de sua vida útil.

Além disto, os materiais compósitos apresentam falhas com características mais complexas que os materiais isotrópicos.

Objetos fabricados com fibra de vidro normalmente possuem distintas camadas com objetivo de se obter algumas propriedades conforme seu uso. Materiais compósitos constituídos de fibra e matriz estão sujeitos às falhas por delaminação, perda de aderência entre fibras e matriz, ruptura da matriz ou ruptura das fibras.

Existem alguns critérios que descrevem matematicamente em que condições um material compósito pode vir a falhar.

Entre os critérios mais comuns está o de Hashin (1980), que considera os modos de falha de compressão nas fibras, tração ou tensão nas fibras, compressão na matriz e tração ou tensão na matriz do compósito, dados pelas seguintes equações

Modo de tração nas fibras

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_A^2}\right) = 1 \quad (9)$$

Modo de compressão nas fibras

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

Modo de tração na matriz

$$\frac{1}{Y_t}(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_A^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (11)$$

Modo de compressão na matriz

$$\frac{1}{Y_c} \left(\frac{Y_c^2}{4S_T^2} - 1 \right) (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4S_T^2} (\sigma_{22}^2 - \sigma_{33}^2) + \frac{1}{S_T^2} (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_A^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (12)$$

As propriedades consideradas para resistência do material são as seguintes:

- Resistência à tração na direção das fibras = 1020 MPa;
- Resistência à compressão na direção das fibras = 620 MPa;
- Resistência à tração na direção transversal as fibras = 40 MPa;
- Resistência à compressão na direção transversal as fibras = 140 MPa;
- Resistência ao cisalhamento = 60 MPa.

Levando em conta o critério de falhas de Hashin, foram feitas 5 simulações com diferentes espessuras para as camadas do material. A tabela 2 mostra que para duas camadas com espessura 0,0035m cada e velocidade de vento 10m/s, o material teria deslocamento da ordem de 0,0625m. Nesta análise não foram considerados fatores de segurança, pois o objetivo foi levar a simulação ao extremo e observar o limite de falha do material.

Espessura (m) 2 camadas iguais	Maior deslocamento (m)	Camada	Critério de falha de Hashin			
			Compressão fibra	Tração fibra	Compressão matriz	Tração matriz
0,0036	0,1928	1	0,300	0,064	4,512	9,814
		2	0,316	0,103	0,973	34,880
0,0040	0,1399	1	0,221	0,052	1,040	2,935
		2	0,240	0,080	0,778	11,200
0,0050	0,0968	1	0,127	0,032	0,306	0,997
		2	0,147	0,054	0,459	3,074
0,0060	0,0759	1	0,082	0,020	0,307	0,526
		2	0,103	0,038	0,292	1,361
0,0070	0,0625	1	0,057	0,014	0,327	0,313
		2	0,077	0,029	0,199	0,727

Tabela 2 – Dados obtidos nas simulações com diferentes espessuras para velocidade de vento 10m/s

Na tabela 2, segundo o critério de falha de Hashin, não haverá falha por nenhum dos modos para espessuras totais a partir de 0,007m. A figura 7 apresenta esta pá modelada com espessura total 0,007m e mostra os valores para o critério de falha de Hashin, na solitação mais crítica (tração na matriz) para a camada 2.

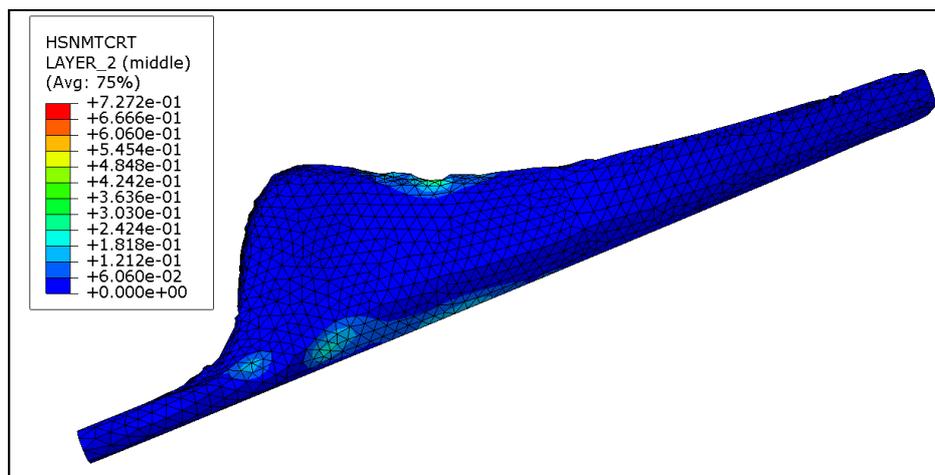


Figura 7: Resultados do critério de falha de Hashin para tração na matriz

A tabela 3 mostra valores de forças atuantes na pá e os respectivos deslocamentos da ponta da pá para diferentes velocidades de vento e espessura total de 0,007m. A tabela 4 apresenta resultados de simulações para pá com espessura total de parede de 0,007m e velocidades de vento de 8 a 40m/s. O maior deslocamento na ponta da pá se dá com maior velocidade de vento e, de acordo com o critério de falha de Hashin, modo de tração na matriz, quando o vento atinge 30m/s ocorre falha na matriz (epóxi) da camada 2 do material.

Velocidade vento (m/s)	Maior deslocamento (m)	Força empuxo	Força rotacional
8	0,0619	$36501.93683 * x^3$	$8111.541520 * x^2$
10	0,0625	$36860.52841 * x^3$	$8191.228537 * x^2$
20	0,0677	$39848.79154 * x^3$	$8855.287012 * x^2$
30	0,0763	$44829.23010 * x^3$	$9962.051136 * x^2$
40	0,0885	$51801.84408 * x^3$	$11511.52091 * x^2$

Tabela 3 – Dados de deslocamento e forças atuantes na pá para diferentes velocidades de vento e espessura de 0,007m

Velocidade vento (m/s)	Camada	Critério de falha de Hashin			
		Compressão fibra	Tração fibra	Compressão matriz	Tração matriz
8	1	0,0558	0,0135	0,3209	0,3073
	2	0,0761	0,0289	0,1951	0,7104
10	1	0,0569	0,0138	0,3269	0,3134
	2	0,0776	0,0295	0,1997	0,7272
20	1	0,0666	0,0162	0,3790	0,3661
	2	0,0908	0,0345	0,2396	0,8777
30	1	0,0847	0,0205	0,4730	0,4631
	2	0,1150	0,0436	0,3135	1,1730
40	1	0,1137	0,0274	0,6193	0,6176
	2	0,1538	0,0580	0,4321	1,6910

Tabela 4 – Dados de falha de Hashin para espessura total 0,007m e diferentes velocidades de vento

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo apresentou, de forma sucinta, modelagem e simulação computacional da estrutura de uma pá, em fibra de vidro, para aerogerador de pequeno porte, com 1,00m de comprimento. A modelagem 3D levou em conta aspectos aerodinâmicos para potencializar a conversão de energia cinética do vento em energia elétrica. Foram atribuídas cargas devido à ação do vento na pá.

A partir da simulação pelo método dos elementos finitos foi possível propor diferentes espessuras para a parede da pá. Conforme resultados apresentados na tabela 2, fica evidente que quanto menor a espessura da parede da pá, maior é o deslocamento na ponta (com condição de engaste na raiz da pá), com a aplicação da carga.

Os resultados obtidos também mostram que, quando se considerou um critério de falha para o material empregado, nesse caso o critério é o de Hashin e o material é fibra de vidro com matriz epóxi, nota-se que os modos de falha na matriz tendem a ser os modos de falha dominantes. Não ocorreram, para as espessuras e velocidades testadas, falhas na direção das fibras.

As simulações levaram em conta o deslocamento, principalmente na ponta da pá, que ocorre após aplicação da carga de serviço. Esse deslocamento deve ter pequena magnitude, pois existe possibilidade de colisão com a torre ou haste de suporte do aerogerador.

Para as simulações aproximarem-se da realidade, deverão ser feitos levantamentos de dados de vento da região onde se pretende instalar o aerogerador.

Os dados obtidos a partir deste estudo podem auxiliar no desenvolvimento do projeto das pás de aerogeradores de pequeno porte. As simulações virtuais de estruturas, assim como simulações de perfis aerodinâmicos feitas por computador, tornaram-se ferramentas bastante importantes quando se pretende projetar equipamentos aerodinâmicos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a PROPESQ/UFRGS pelo suporte financeiro para realização dessa pesquisa e aos estudantes de graduação em engenharia Gabriel Birck e Anderson Peccin da Silva, por sua colaboração nas análises numéricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Burton, T.; Sharpe, D.; Jenkins, N.; Bossanyi, E., *Wind energy: handbook*. Ed. John Wiley & sons, England, 2001.
- Carvalho, P., *Geração Eólica*. Ed. Imprensa Universitária, Fortaleza, Brasil, 2003.
- Epaarachchi, J. A.; Clausen, P. D., *The development of a fatigue loading spectrum for small wind turbine blade*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, p. 207-223, 2006.
- Gasch, R.; Twele, J., *Wind Power Plants*. Ed. Solarpraxis AG, Germania, 2002.
- GWEC – Global Wind Energy Council, *Global Wind 2009 Report*. Ed. Angelika P., Liming Q. e Steve S., Belgica, 2010.
- Habali, S. M.; Saleh, I. A., *Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root*. Energy Conversion & Management, p. 249-280, 2000.
- Hashin, Z. *Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites*. Journal of Applied Mechanics, v.47, p.329-334, 1980.
- Jureczko, M. *et al*, *Optimization of Wind Turbine Blade*. Journal of Materials Processing

- Technology, p. 463-471, 2005.
- Kaminski, C. P., *Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade*. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2008.
- Neto, F. L.; Pardini, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. Ed. Edgard Blücher, Brasil, 2006.
- Shokrieh, M. M.; Rafiee, R., *Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade*. Composite Structures, p. 332-342, 2006.
- Tolmasquim, M. T., *Fontes renováveis de Energia no Brasil*. Ed. Interciência, Brasil, 2003.