AERODYNAMICAL AND MECHANICAL DESIGN OF TURBINE BLADE

Santos, S. M.[1,*], Pinho, J. M.[1], Keller, P.P.[1], Dias, G. C.[2], Dos Santos, E.D.[3]

[1] School of Engineering, Universidade Federal do Rio Grande, Italia Avenue, km 8, Cx.P. 474, Rio Grande, RS, Brasil, 96201-900.

[2] State Company of Electric Energy (CEEE), Rua General Osório, s/n, Rio Grande, RS, Brasil, 96200-400.

[3] Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sarmento Leite Street, 425, Porto Alegre, RS, Brasil, 90050-170.

Abstract

The present work presents a study concerned with the project of a wind turbine. This task is basically shared in two steps. The first one is the blades aerodynamic project, with the purpose of taking more advantage of the wind kinetic energy and the second one is concerned with the mechanical project of the blades, in order to support the loads over the blades during the operation period. The graphical modeling and the mechanical project of the blades are performed with the computational softwares AutoCad® and Excel. The commercial code Ansys® is employed to analyze the mechanical resistance and the reliability of the blade. To perform the prediction of the wind action efforts over the blade is used the aerodynamic analysis including forces, such as: axial, tangential, weight and centrifugal ones, and aerodynamic momentum. The blades are composed of fiberglass shell reinforced with plastic material. Vertical and horizontal reinforcements of wood and carbon fiber, respectively, are also employed.

Keywords: Turbine, Mechanical Design, Aerodynamical Design, Numerical Analysis.

* Corresponding author: sonia036@gmail.com Phone: +5553 3233 6883

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Componentes de velocidade atuantes na pá

Conforme a FIGURA 1, o vento incide na pá na direção do vetor $\vec{W}$. Ele é chamado velocidade aparente do vento, pois é a velocidade relativa entre a velocidade do vento e a velocidade tangencial da pá.

O ângulo entre a linha de corda e a direção do vento aparente é o chamado ângulo de ataque do perfil (α). A inclinação entre a linha de corda e o plano do rotor forma o ângulo (β). A inclinação entre a velocidade relativa e o plano do rotor forma o ângulo (ϕ). O vetor $\vec{u}$ corresponde à velocidade útil do vento na direção do eixo do rotor, parcela da velocidade livre do vento V_0. Um raio qualquer da pá é representado pela letra r e Ω é a velocidade angular da turbina (Eggleston e Stoddard, 1987).

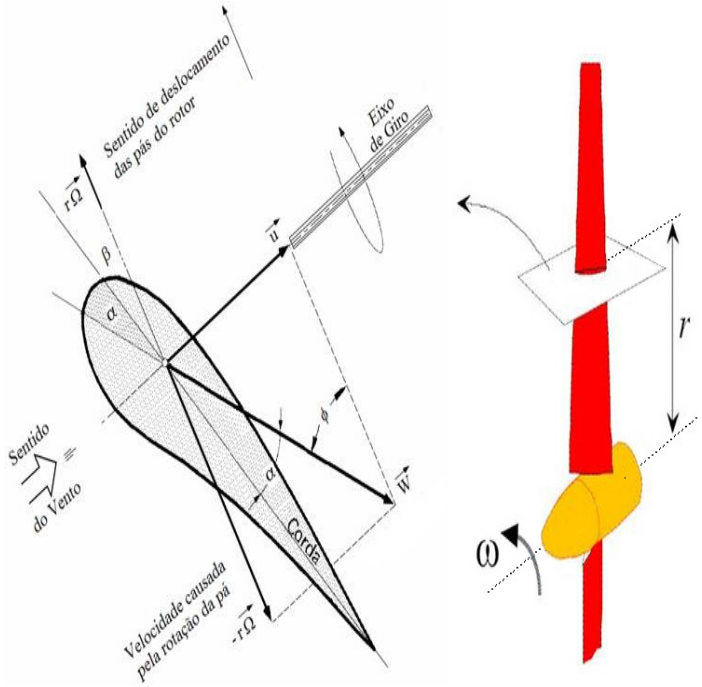

Figura 1 - Componentes de velocidade que incidem sobre a pá.

1.2. Perfis aerodinâmicos

Uma ampla gama de perfis aerodinâmicos são utilizados em turbinas eólicas. Dentre eles se destacam os perfis das famílias NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), RISØ (RisØ National Laboratory), FFA (The Aeronautical Research Institute of Sweden) e NREL (National Renewable Energy Laboratory).

Estudos comparativos realizados pelos principais laboratórios sugerem perfis, ou combinações de perfis, para construção de pás em função das dimensões e da potência gerada. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** aponta dados de seleção do tipo de perfil (Bertagnolio et al., 2001; Somers, 1993).

Tabela 1 – Sugestão de perfis para turbinas (NREL)

Comprimento da pá (m)	**Potência de geração (kW)**	**Família do perfil**
1 a 5	2 a 20	Espessa: S823 e S822
5 a 10	20 a 50	Fina: S801, S803, S804
5 a 10	20 a 50	Fina: S805 a S808
5 a 10	20 a 50	Espessa: S819 a S821
10 a 15	150 a 400	Espessa: S809, S810,S814, S815
10 a 15	150 a 400	Espessa: S812 a S815
10 a 15	150 a 400	Espessa: S814, S815, S825, S826
15 a 25	400 a 1000	Espessa: S816 a S818
15 a 25	400 a 1000	Espessa: S818, S827, S828

1.3. Geração dos perfis de cada estação da pá

Os pontos dos perfis estão dispostos em sistemas de coordenadas locais (x , y), próprios de cada estação da pá. Para modelar a pá como sólido é necessário termos esses mesmos pontos (de todos os perfis) dispostos em um único sistema de coordenadas de três dimensões, o sistema global de coordenadas (X , Y , Z).

A mudança dos sistemas de coordenadas de cada ponto superior de um perfil ($P_{j_{k_s}}$) é determinada segundo as Eq. (1) – (3) (Figueiredo et al., 1996).

$$X_{j_{k_s}} = r \cdot sen\left\{\frac{2 \cdot \left[\left(x_{j_k} - x_{j_{CG}}\right) \cdot \cos\beta - \left(y_{j_{k_s}} - y_{j_{CG}}\right) \cdot sen\beta\right]}{2 \cdot r}\right\} \tag{1}$$

$$Y_{j_{k_s}} = -r \cdot \cos\left\{\frac{2 \cdot \left[\left(x_{j_k} - x_{j_{CG}}\right) \cdot \cos\beta - \left(y_{j_{k_s}} - y_{j_{CG}}\right) \cdot sen\beta\right]}{2 \cdot r}\right\} \tag{2}$$

$$Z_{j_{k_s}} = -\left(y_{Jks} - y_{JCG}\right) \cdot \cos\beta - \left(x_{Jk} - x_{JCG}\right) \cdot sen\beta \tag{3}$$

Tendo os pontos da superfície da pá gerados pelo Excel é possível entrar com essas coordenadas em um programa computacional de modelagem AutoCad®

e gerar esses pontos. Unindo os pontos de cada estação da pá obtêm-se a pá em 3D.

1.4. Forças atuantes sobre um perfil aerodinâmico

Na FIGURA 2 pode-se observar as forças que agem sobre um perfil aerodinâmico posto sob a ação do vento (Eggleston e Stoddard, 1987).

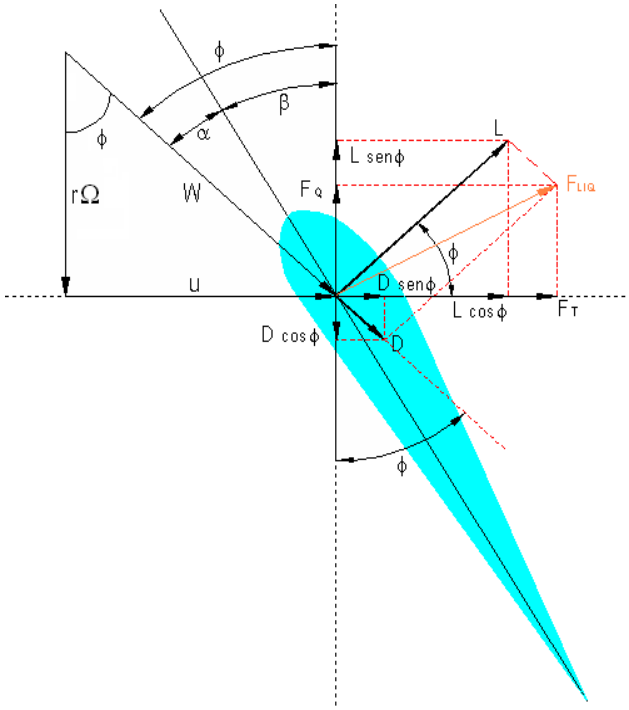

Figure 2 - Forças atuantes sobre um perfil aerodinâmico (Eggleston e Stoddard, 1987).

onde $\vec{F}_T$ é a força produzida pelo do vento na direção axial; $\vec{F}_Q$ é a força produzida pelo vento na direção tangencial; $\vec{F}_{LIQ}$ é a força produzida pelo vento.

As forças axial e tangencial são dadas pelas Eq. (4) – (5).

$$\vec{F}_T = \vec{L} \cdot \cos\phi + \vec{D} \cdot sen\phi \quad (4)$$

$$\vec{F}_Q = \vec{L} \cdot sen\phi - \vec{D} \cdot \cos\phi \quad (5)$$

Sendo *L* a força de sustentação e *D* a força de arrasto, dadas pelas Eq. (6) - (7).

$$L = C_L \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot \vec{W}^2}{2} \quad (6)$$

$$D = C_D \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot \vec{W}^2}{2} \quad (7)$$

C_L e C_D são características dos perfis em função de α e o número de Reynolds.

As forças peso, centrífuga, axial e tangencial e o momento aerodinâmico, vão ser aplicados num ponto médio entre dois perfis da pá segundo (Homel, 2005). A FIGURA 3 demonstra o ponto de aplicação dos esforços.

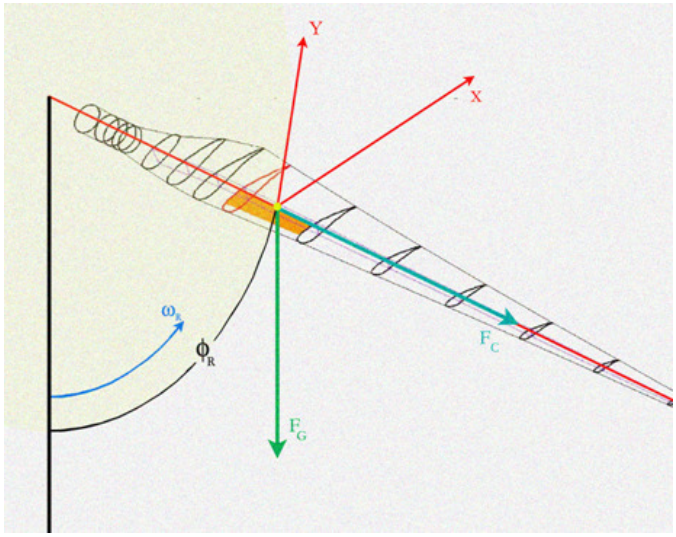

Figura 3 - Pontos de aplicação das cargas na pá (Homel, 2005)

1.4. Concepção da geometria da pá

A geometria da pá não se limita a uma simples casca. Em muitos casos utilizam-se reforços internos para aumentar o momento de inércia da estrutura (Engbretcht, 2004; Habalia e Saleh, 2000). Esses reforços podem ser observados na FIGURA 4.

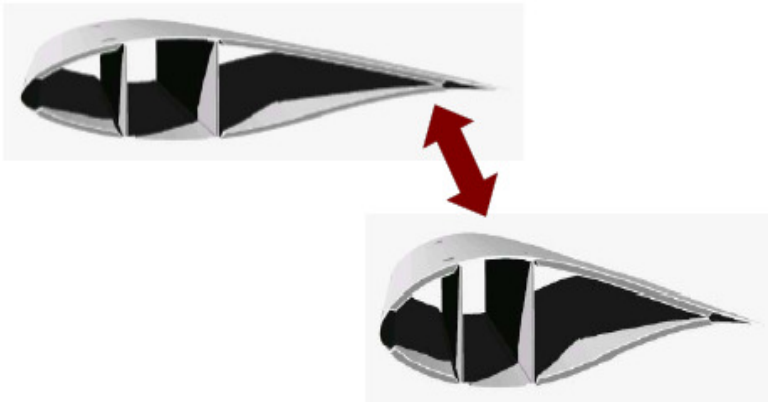

Figura 4 - Propostas de Configurações da geometria da pá (Habalia e Saleh, 2000).

2. PROJETO DESENVOLVIDO NA FURG

2.1. Dimensionamento aerodinâmico das pás

As condições de operação pré-determinadas para esse gerador eólico são: Velocidade livre do vento: $\vec{V}_0$ =10.5m/s; Potência do aerogerador: *P* = 30CV; Freqüência de rotação: *f* = 100rpm; Número de pás: *B* = 3pás; Temperatura média: *T* = 20°C.

O projeto aerodinâmico das pás foi desenvolvido por Azevedo e Santos (2006) utilizando-se os programas computacionais AutoCad ® e Excel para fazer a modelagem gráfica.

2.2. Geração dos perfis da pá

A FIGURA 5 apresenta as coordenadas globais dos pontos de 116 perfis planos, modelo S821, plotados no AutoCad® por Corrêa et al. (2007). A pá apresenta um comprimento de 6,30 m.

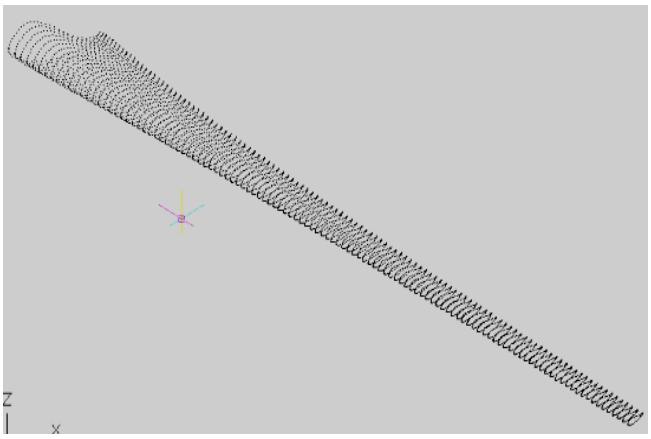

Figura 5 - Perfis Planos (Corrêa et al, 2007).

2.3. Concepção da geometria da pá

Na execução deste projeto, optou-se por utilizar reforços internos de diferentes espessuras, dispostos segundo a FIGURA 6. Os reforços verticais estão distantes 50mm entre si. Os reforços horizontais foram colocados entre os reforços verticais e em contato direto com a casca externa da pá.

Os materiais escolhidos e a forma como eles estão distribuídos na pá, podem ser observados na FIGURA 6 e Tabela 2.

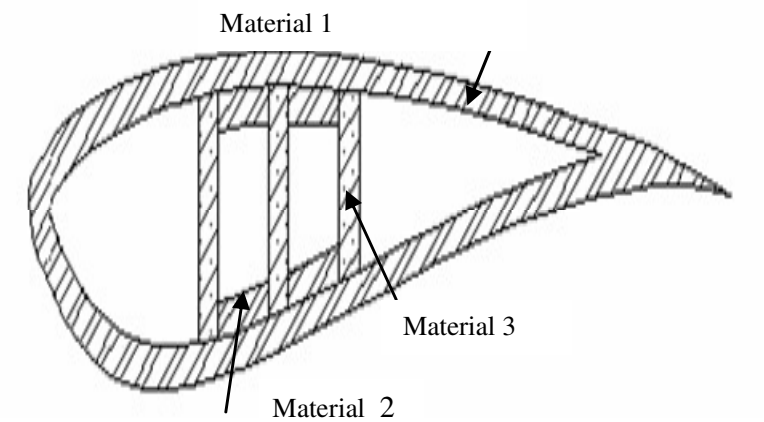

Figura 6 - Reforços com seus devidos materiais (Guterres et al., 2007).

Tabela 2 – Regiões e seus devidos materiais (Guterres et al., 2007).

Localização do material	Tipo de material	Composição do material
Superfície da Pá	Material 1	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
Reforço Horizontal	Material 2	Compósito de Fibra de Carbono
Reforço Vertical	Material 3	Madeira de Pinus Revestida com Fibra de Carbono

2.4. Projeto mecânico da pá

Com o programa Ansys® são calculadas as tensões equivalentes de Von Misses, com as propriedades de cada material, e comparadas com a tensão de escoamento do material, segundo Shigley et al. (2005). A FIGURA 7 apresenta os resultados.

O resultado da análise realizada para a superfície da pá, neste projeto apontou uma tensão equivalente de Von Misses máxima de 18.85 MPa. Para determinar se ocorre falha mecânica na pá na situação analisada, bastou comparar com a tensão de escoamento do material, que é 63 MPa.

Para se determinar o fator de segurança obtido (*N*), recorre-se à Eq. (8).

$$N = \frac{\text{Tensão_de_escoamento}}{\text{Tensão_Equivalente_de_von_Mises_Máxima}} \quad (8)$$

O resultado apresentou um fator de segurança igual a 3.34. Esse fator de segurança representa um resultado bastante satisfatório para a análise do projeto.

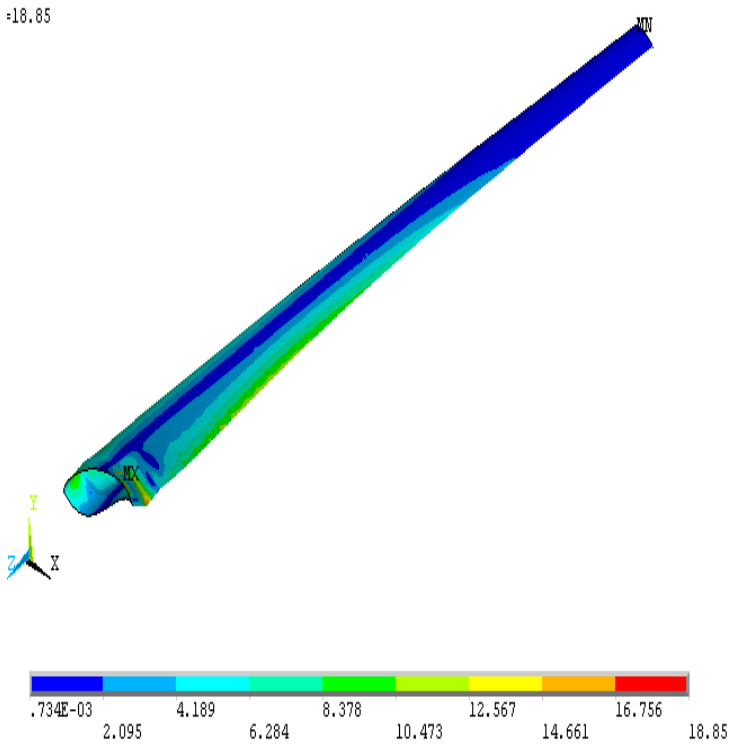

Figura 7 - Tensões equivalentes de Von Misses (Guterres et al., 2007).

2.5. Construção dos perfis da pá

A FIGURA 8 apresenta etapa de construção dos perfis em madeira balsa realizada por Corrêa et al. (2007). Enquanto que, nas FIGURAS (9) e (10) são mostradas as etapas de construção do modelo e do molde para confecção das pás segundo Pinho et al. (2009).



Figura 8 - Perfis da pá construído em madeira balsa (Corrêa et al., 2007).



Figura 9 - Modelo da Pá Pintado com Duas Mãos de Tinta Poliuretano (Pinho et al., 2009).



Fig. 10. Duas Metades Componentes do Molde (Pinho et al., 2009).

3. CONCLUSÕES

Ao longo do trabalho procurou-se mostrar a aplicação de modelagem computacional para projeto aerodinâmico e mecânico de pás de turbinas eólicas, aliada a métodos de fabricação das pás. A metodologia pode também ser aplicada a outros tipos de turbinas, como as hidráulicas, variando-se apenas as formas de carregamento dos esforços.

REFERENCES

AZEVEDO, M.S., SANTOS, S.M., **Projeto aerodinâmico de aerogerador de 30 CV**, Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, FURG, 2006.

BERTAGNOLIO, F., ET AL., **Wind Turbine Airfoil Catalogue**, Denmark, 2001.

CORRÊA, M., BUENO, M., SANTOS, S.M., **Construção de molde e modelo de pá de aerogerador de 30 CV**, Projeto Graduação em Engenharia Mecânica, FURG, 2007.

EGGLESTON, D. M., STODDARD, F.S., **Wind Turbine Engineering Design**, New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.

ENGBRETCHT, J., Relevant issues of carbon fiber for the energing wind market, Toray carbon fiber america, **Sandia Blade Workshop**, 2004.

FIGUEIREDO, L.M., LIPIARKI, J., SANTOS, S.M., **Projeto mecânico e construção de modelo de rotor de turbina tipo hélice**, Projeto Graduação em Engenharia Mecânica, FURG, 1996.

GUTERRES, A. M., DOURADO, D.A.T., SANTOS, S.M., **Projeto aerodinâmico e construção de modelo de pás de aerogerador de 30 CV**, Projeto Graduação em Engenharia Mecânica, FURG, 2007.

HABALIA, 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**, Vol. 41, 2000, pp. 249-280.

HOMEL, M., **Mechanical Design wind turbine blades**, University of Utah, 2005.

PINHO, J.M., KESSLER, P.P., SANTOS, S.M., **Construção de pás de turbina eólica e projeto sistema de controle das pás**, Projeto Graduação em Engenharia Mecânica, FURG, 2009.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, C.R., BUDYNAS, R.G., **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª Edição, Ed. Makron, 2005.

SOMERS, D.M., **The S822 and S823 Airfoils**, NREL, State College, Pennsylvania, 1993.

ACKNOWLEDGEMENTS

O projeto tem o apoio financeiro do CNPq, através do Edital CTEnerg 028-2006.