

Montagem e testes de uma bancada para medição de desempenho de aerogeradores em escala

(Building and testing of a bench to measure the performance of wind generators in scale)

P.A.C. Rocha¹, F.O. Carneiro, A.S. Lopes, I.A. Maia e A.B. Modolo

Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ce, Brasil

Recebido em 22/9/2009; Aceito em 23/6/2010; Publicado em 6/7/2011

O presente trabalho consistiu na montagem e testes, na disciplina Energia Eólica do curso de Engenharia Mecânica, de uma bancada cujo objetivo é o levantamento de curvas de potência para diferentes pás de aerogeradores, com torção e comprimento da corda calculados pelo método do momento do elemento de pá (BEM). Desta forma as pás foram projetadas e construídas, o aerogerador foi montado e teve levantado seu gráfico de desempenho, que apresenta o coeficiente de potência gerado no eixo versus a velocidade específica na ponta da pá (λ). Para a realização dos experimentos foi utilizado um ventilador de coluna com potência de 200 W, que gerou uma velocidade média do vento de 3,8m/s, medida com anemômetro portátil. Os testes foram realizados com uma turbina bipá em escala de 1:4, projetada e construída com o perfil S809, que obteve coeficiente de potência máximo de 20,57%. A curva de desempenho da turbina foi traçada, demonstrando sua boa adequação a projetos de aproveitamento de energia eólica.

Palavras-chave: energia eólica, aerodinâmica, coeficiente de potência, teoria do momento do elemento de pá.

The present article consists in the development of a new bench to measure the power curves of different wind turbine blades. The components were built and tested to assure adequate measurements and secure operation. The bench was used in the Wind Energy class of the Mechanical Engineering undergraduate and graduate programs. It allows the measurements of the power curves of different wind turbine blades. Using the blade element momentum method (BEM) to calculate the pitch angles and chord lengths, blades were manufactured and tested. The performance was determined by the power curves, which represent the power coefficient versus the tip speed ratio (λ value). In the experiments, a 200 W fan generated an average wind speed of 3,8 m/s, measured with a portable anemometer. The tests were carried out with a two-bladed turbine, designed (S809 profile) on a 1:4 scale. These blades achieved a maximum performance coefficient of 20,57%. The performance curve was plotted, demonstrating the bench good adequacy to wind energy assessment projects.

Keywords: wind energy, aerodynamics, power coefficient, blade element momentum theory.

1. Introdução

A energia eólica vem se apresentando, nos últimos anos, como uma das mais viáveis fontes de energia renovável, devido, principalmente, à sua natureza inesgotável e não poluidora. Dessa forma, o estudo de aerogeradores vem ganhando espaço nas discussões acadêmicas e na produção científica [1, 2].

Um dos fatores mais importantes na análise de um projeto de um aerogerador é o estudo de sua curva de potência, ou curva característica. Esta consiste no gráfico da potência versus λ , que é a velocidade específica na ponta da pá, ou o coeficiente de potência versus λ , sendo o primeiro a razão entre a potência mecânica gerada no eixo do aerogerador e a

potência eólica (fluxo de energia cinética).

Uma forma de se comparar o desempenho real de um determinado aerogerador com o desempenho previsto na literatura é através da sua construção em escala. Neste trabalho, foi montado um aparato para a obtenção das curvas de potência (coeficiente de potência versus λ) de um aerogerador projetado e construído, em escala de 1:4, na disciplina Energia Eólica do curso de Engenharia Mecânica, utilizando-se a pá com o perfil aerodinâmico S809 [3]. O aparato consiste em uma bancada de madeira, um eixo de alumínio, uma flange de alumínio, dois rolamentos e uma polia. A turbina projetada foi submetida às mesmas condições de vento, tendo o torque medido sob diferentes condições de carga.

¹E-mail: paulo@posmec.ufc.br.

2. Metodologia

2.1. Primeiro passo: montagem da bancada

A bancada construída e utilizada nos testes (Fig. 1) foi feita utilizando-se madeira, um tubo de alumínio de 1/2 polegada, uma flange com furos para o acoplamento da turbina a ser testada, e dois rolamentos NSK-UC204.

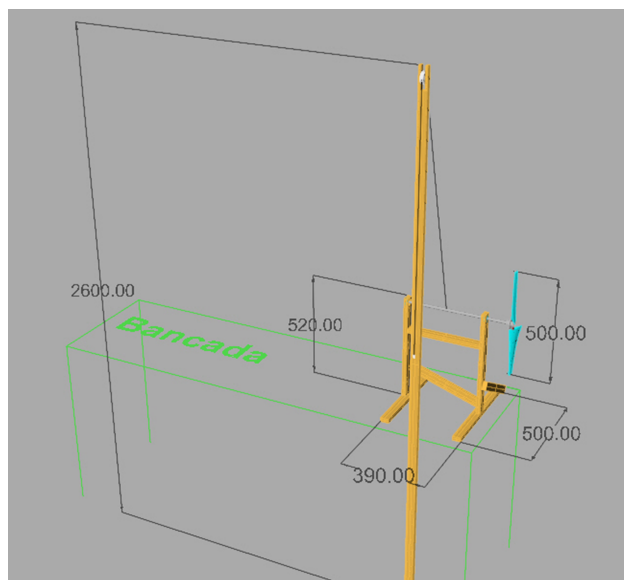


Figura 1 - Desenho esquemático da bancada construída, já com a pá acoplada (em azul, à direita). O fio que levanta a massa fica preso diretamente no eixo, passando por cima da polia da régua na lateral (em branco, acima). A necessidade do acoplamento direto se deve ao baixo torque e alta velocidade angular previstos para este tipo de turbina.

2.2. Segundo passo: o projeto e a construção das pás

2.2.1. A teoria do momento do elemento de pá (blade element momentum theory - BEM)

Para se avaliar o escoamento sobre aerogeradores, o rotor é modelado como um disco atuador que interfere no escoamento do ambiente. A interferência é dividida em uma componente axial e uma tangencial, descritas pelos seus respectivos fatores. O fator de interferência axial (a) é a fração de velocidade axial que o fluido perde ao passar pela turbina. Analogamente, o fator

de interferência tangencial (a') é a fração da velocidade de rotação do rotor que é transferida para o fluido em forma de momento angular.

A teoria BEM admite escoamento bidimensional sobre as pás, ou seja, a componente radial da velocidade é ignorada. Essa condição é satisfeita se o fator de interferência axial não variar radialmente [4, 5]. Para cada posição radial (o elemento de pá, que se comporta como um perfil aerodinâmico isolado) as componentes da velocidade podem ser determinadas em função da velocidade do vento, da velocidade de rotação do rotor e dos fatores de interferência. Se a relação entre as características aerodinâmicas do aerofólio, coeficiente de sustentação (C_L) e coeficiente de arrasto (C_D), e o ângulo de ataque (α) é conhecida, pode-se determinar as forças sobre as pás. Tais forças, de natureza aerodinâmica, são o arrasto (D) e a sustentação (L). As equações da teoria BEM são então desenvolvidas de forma a obter a geometria de máxima eficiência para um gerador eólico com controle de velocidade. Neste tipo de gerador a rotação não é constante, mas a velocidade específica (λ) sim. A geometria do rotor é então completamente definida por dois parâmetros: o ângulo de incidência do vento sobre a pá (ϕ) e a corda da pá em cada posição radial (c).

Para maiores detalhes sobre a teoria BEM, recomenda-se, além de outras, a Ref. [5].

2.2.2. Montagem das pás

Os testes foram realizados com um aerogerador de duas pás em escala de 1:4, com perfil aerodinâmico NREL S809. Este foi projetado de acordo com a teoria do momento no elemento de pá (BEM) [5], teoria essa que calcula os ângulos de torção para a pá de acordo com o perfil e o diâmetro da mesma. A turbina possuía um diâmetro de 50 centímetros, sendo dotada de duas pás. Esta escolha se deveu à dificuldade de construção para o caso de turbina tripá, pois os perfis ficariam muito pequenos na ponta da pá, inviabilizando seu corte, que foi feito à mão em madeira balsa (Fig. 2)

Uma vez cortados os perfis (20 por pá), estes foram encaixados nas longarinas-guia, já dando a torção projetada (Fig. 3). Feito isto, a estrutura foi coberta com uma capa de madeira balsa. Como a mesma não suporta grandes torções, ela foi substituída por fita isolante no bordo de ataque.

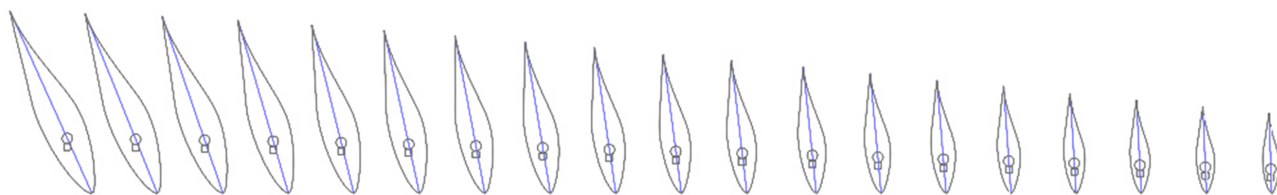


Figura 2 - Gabaritos de corte dos perfis, aplicados sobre madeira balsa. Os desenhos já foram feitos com a previsão de passagem das duas longarinas (uma circular e outra quadrada), de forma a garantir o ângulo de torção projetado.

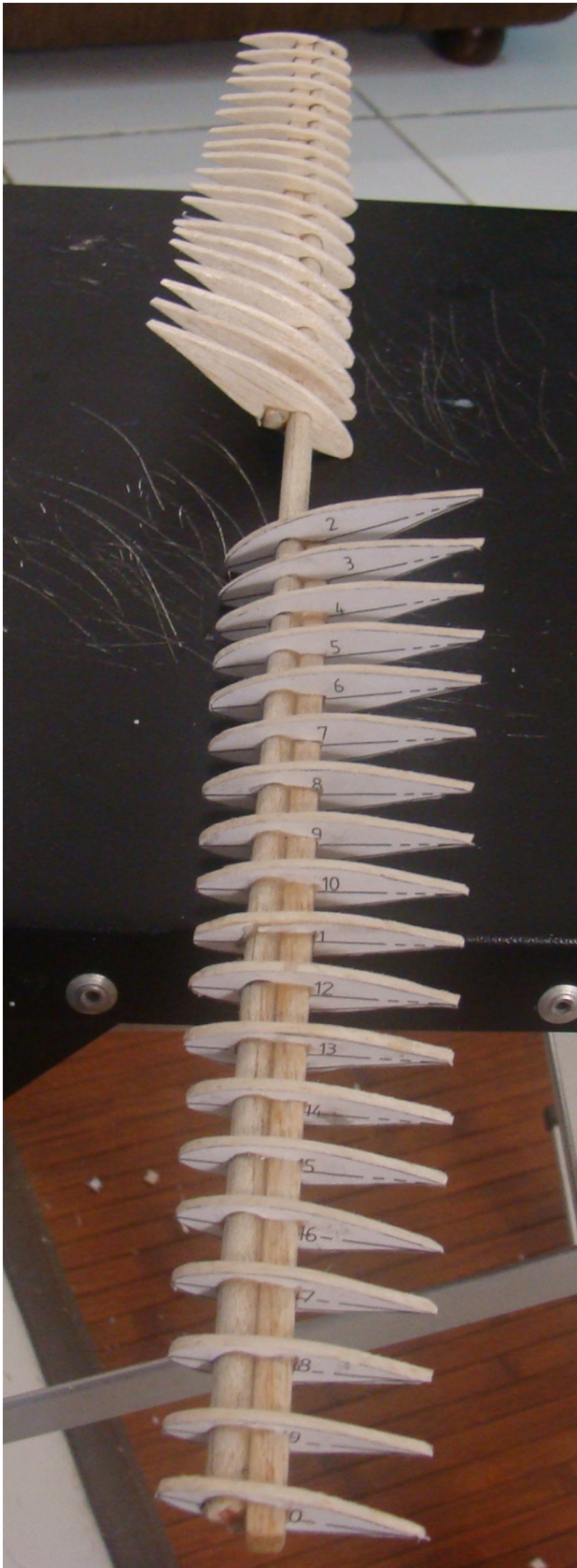


Figura 3 - Gabaritos dos perfis, já montados sobre as longarinas. Percebe-se a torção de projeto (decréscante da raiz para as pontas).

2.3. Terceiro passo: os testes

Durante os testes, a turbina construída foi submetida a uma mesma condição de vento, produzida por um ventilador de coluna com uma potência de 200 W, que gerou ventos com velocidade média de aproximadamente 3,8 m/s (valor obtido com anemômetro portátil). A variação observada foi da ordem de $\pm 0,4$ m/s, com o maior valor encontrado na região central. Como o propósito do trabalho foi tanto ser de fácil execução como didático, não houve preocupação em controlar o nível de turbulência do escoamento provocado pelo ventilador.

A bancada com o aerogerador foi posicionada a um metro de distância do ventilador e à mesma altura deste. O objetivo foi fazer com que o vento produzido pelo ventilador girasse o aerogerador e este erguesse uma determinada massa. Para tanto, um fio de náilon foi amarrado ao eixo de alumínio e passado através de uma polia, que se situava ao lado e acima da bancada, presa em uma haste vertical de madeira. As massas eram amarradas à extremidade livre do fio de náilon (ver Fig. 1).

Primeiramente, era determinado o torque de partida, ou seja, a massa para a qual o aerogerador não teria torque suficiente para erguer, no mesmo tempo em que esta também não desceria. O próximo teste era realizado sem nenhuma massa, e então a massa era aumentada gradualmente até atingir-se novamente o torque de partida.

Foram feitas duas marcações na haste de madeira que ficava ao lado da bancada, com uma distância de 1 metro de uma para a outra, e cronometrava-se o tempo que as massas levavam para percorrer esta distância. Para cada massa, o teste era repetido 10 vezes, e utilizou-se a média aritmética para a construção da curva de desempenho.

2.4. Equações

Foram usadas as seguintes equações básicas para a construção do gráfico coeficiente de potência versus lambda:

1. Potência mecânica, P_m

$$P_m = \omega r P, \quad (1)$$

onde r é o raio do eixo de alumínio, P é o peso da carga erguida pelo aerogerador e ω é a velocidade angular do eixo;

2. Potência Eólica, P_e

A potência eólica, ou fluxo de energia cinética, mede o fluxo de energia que passa em uma determinada área no espaço, ou seja, é a energia cinética ($1/2 mv^2$) em uma base de tempo. Para um aerogerador, $\frac{dm}{dt} = \rho v \pi R^2$, o que resulta em

$$P_e = 1/2 \rho v^3 \pi R^2, \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do ar, v é a velocidade do vento e R é o raio da pá;

3. Velocidade angular do eixo, ω

$$\omega = \frac{V}{r}, \quad (3)$$

onde V é a velocidade de subida da carga, ω é a velocidade angular da pá, e r é o raio do eixo;

4. Coeficiente de potência, C_p : é a razão entre a potência mecânica e a potência eólica

$$C_p = \frac{P_m}{P_e}. \quad (4)$$

5. Velocidade específica, λ

É uma grandeza adimensional que caracteriza máquinas rotativas. Para aerogeradores, é a razão entre a velocidade na ponta da pá e a velocidade do vento.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}, \quad (5)$$

onde o produto ωR é a velocidade na ponta da pá e v é a velocidade do vento.

As velocidades angulares do eixo e da pá eram as mesmas, pois os dois giravam acoplados. A velocidade de subida da carga, V , é obtida com o tempo cronometrado e a distância pré-estabelecida de 1 metro. A partir desta velocidade foi determinada a velocidade angular do eixo, e então as potências eólicas e mecânicas foram obtidas, pois a velocidade do ar e o raio da pá eram constantes, e a carga era conhecida.

3. Resultados e Discussão

A Fig. 4 apresenta a curva de afilamento da pá projetada ($\lambda = 5$), usando correção para pá refinada, o que facilita a construção da mesma, por ser reta. Já a Fig. 5 mostra a torção geométrica projetada da pá, ao longo do raio da mesma. Foi aplicado o equacionamento da teoria do momento do elemento de pá (BEM) [4, 5].

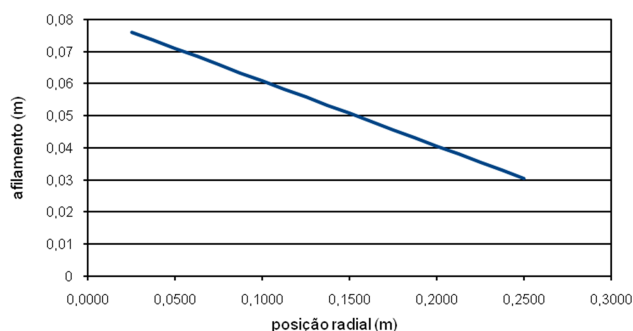


Figura 4 - Curva de afilamento da pá projetada, usando correção para pá refinada.

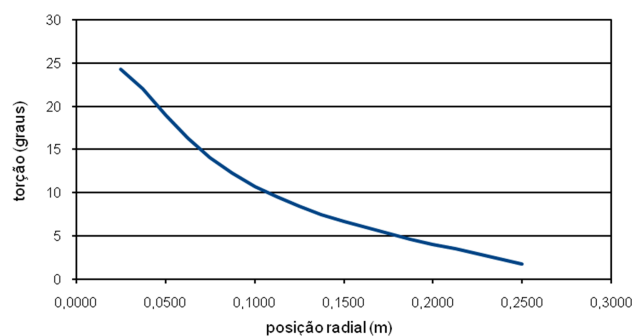


Figura 5 - Curva de torção geométrica da pá projetada, usando correção para pá refinada.

A Fig. 6 mostra o gráfico de desempenho da turbina projetada utilizando o perfil NREL S809.

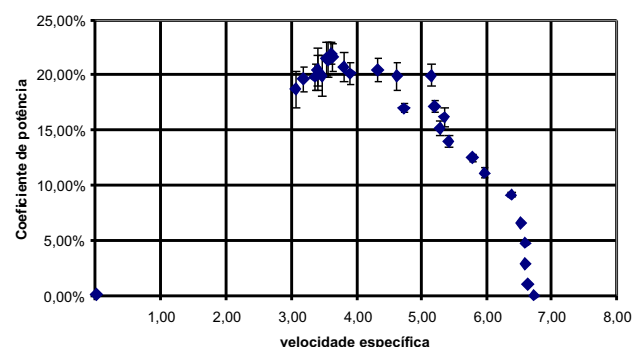


Figura 6 - Gráfico de desempenho da turbina projetada com perfil NREL S809.

Pode-se observar pelos resultados que a pá projetada com o perfil S809 teve um desempenho apropriado para pequenos aerogeradores a baixa velocidade de vento [6], tendo em vista o limite de Betz [7], atingindo um coeficiente de potência máximo de 21,82%.

A turbina eólica projetada com o perfil S809 obteve seu melhor desempenho na faixa de 3,5 a 7 dos valores de velocidade específica, uma faixa relativamente ampla, comportamento que se espera em perfis para aerogeradores, que devem funcionar sem descolamento da camada limite sob diversas condições de rotação e velocidade do vento.

A queda brusca à esquerda na curva de potência do S809 já era prevista, pois o objetivo do projeto deste perfil [3] é fazer com que ele mantenha os valores máximos de sustentação até que ocorra descolamento significativo do escoamento sobre a pá, que desta forma ocorre de maneira súbita.

4. Conclusão

Para a realização deste trabalho, primeiramente, a bancada para os testes foi projetada e desenhada em um software de modelagem tridimensional, e o aerogerador foi projetado a partir da teoria do momento no elemento de pá, vista em sala de aula. Em seguida, a bancada foi construída utilizando-se os materiais citados e

o aerogerador em escala foi montado com duas pás, um diâmetro de 50 cm e utilizando o perfil aerodinâmico NREL S809.

Após a turbina ser testada até a carga máxima que esta podia erguer, o desempenho foi medido e mostrado no gráfico do coeficiente de potência versus a velocidade específica. Os resultados mostram que o S809 obteve um desempenho aerodinâmico bastante satisfatório. Além disso, pôde-se concluir que o S809 é realmente adequado para aerogeradores situados em locais com grandes variações na velocidade do vento, visto que ele opera em uma faixa de velocidade específica bem larga.

Por fim, a bancada e o sistema desenvolvidos para o levantamento da carga apresentam a vantagem de poderem ser usados para determinação de curvas de desempenho de outros aerogeradores.

Referências

- [1] F.R. Martins, R.A. Guarnieri e E.B. Pereira, Revista Brasileira de Ensino de Física **30**, 1304 (2008).
- [2] A. Evans, V. Strezov and J.T. Evans, Renewable and Sustainable Energy Reviews **13**, 1082 (2009).
- [3] D.M. Somers, *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil* (National Renewable Energy Lab., Golden, 1997).
- [4] A.C.C. Alvarez, P.A.C. Rocha and F.O.M. Carneiro, in: Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador (2008), CD-Rom.
- [5] T. Burton, D. Shape, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook* (John Wiley & Sons Ltd., 2001).
- [6] A.K. Wright and D.H. Wood, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **92**, 1265 (2004).
- [7] A. Betz, *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen* (Vandenhoeck and Ruprecht, Göttingen, 1926), reprint by Öko-Verlag, Kassel, 1982.