

MODELAGEM AERODINÂMICA DAS PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

Daniel Fonseca de Carvalho e Silva
danielcarvalho@ufrj.br

Gustavo César Rachid Bodstein
gustavo@serv.com.ufrj.br

Departamento de Engenharia Mecânica – EE/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68503
21945-970 Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Resumo. Motivado pela crescente implantação de sistemas eólicos em todo o mundo e as grandes perspectivas para sua exploração no Brasil, este trabalho apresenta um procedimento de cálculo para determinar a configuração aerodinâmica ótima das pás de um rotor de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine) para aproveitamento de energia eólica. A partir de equações de conservação e a utilização da Teoria de Aerofólios Finos, a configuração geométrica básica do rotor eólico é determinada. A modelagem restringe o grande número de variáveis geométricas que influenciam a configuração aerodinâmica do rotor. O programa desenvolvido, implementado numericamente na plataforma Matlab, parte das condições locais de vento, potência requerida e outras informações de projeto e, através de uma interface de fácil utilização, calcula o valor do raio do rotor, além de mostrar como a corda do aerofólio e a torção das pás variam ao longo do seu raio. Adicionalmente, algumas informações sobre o desempenho do rotor para condições diferentes das de projeto também são fornecidas pelo programa. Os resultados gerados permitem o dimensionamento dos demais componentes do sistema eólico.

Palavras-chave: Energia Eólica, Turbinas eólicas, Aerodinâmica, Aerofólio, Pás do Rotor.

1. INTRODUÇÃO

Após a crise do petróleo de 1979, as fontes renováveis de energia adquiriram um interesse particular, não só pela geração de energia propriamente dita, mas também pela crescente preocupação ecológica com a emissão de poluentes oriundos da queima dos combustíveis fósseis. No grupo das Fontes Alternativas de Energia, denomina-se de Fontes Renováveis de Energia as formas de geração teoricamente inesgotáveis, podendo-se destacar as energias: solar, das marés, geotérmica, eólica e a própria hidroeletricidade.

Devido a diversas políticas de incentivo e ao desenvolvimento tecnológico das turbinas eólicas, também chamadas de aerogeradores ou cata-ventos, as instalações eólicas no mundo vêm crescendo a cada ano, sobretudo em países como Alemanha, Espanha, EUA e Dinamarca. Segundo a WWEA (*World Wind Energy Association*), estes países aparecem nas primeiras posições no que se refere à potência instalada. No Brasil, a potência instalada ainda é muito pequena, 25 MW, mas tende a crescer rápido. Segundo o recente Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Amarante *et al.*, 2001), existem diversas áreas no território nacional com enorme potencial eólico, sobretudo nos litorais nordeste e sul.

Desde a turbina de Charles Brush, de 1888, até as modernas turbinas do parque *offshore* de *Horns Rev*, instalado na costa da Dinamarca, as dimensões das Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*) têm crescido significativamente para que a energia eólica se torne economicamente viável como uma fonte renovável de geração de energia elétrica. Os rotores, hoje, já atingem 80 m de diâmetro. Como as turbinas são o meio físico de captação da energia mecânica disponível nos ventos, o projeto aerodinâmico do rotor é de fundamental importância para a realização eficiente desse processo. Este trabalho se propõe a elaborar um procedimento de cálculo, programado em plataforma Matlab, para determinar a configuração aerodinâmica ótima das pás de um rotor de uma turbina do tipo HAWT. O programa computacional desenvolvido permite realizar o projeto aerodinâmico e analisar a influência dos parâmetros geométricos e aerodinâmicos envolvidos.

2. O RENDIMENTO DE UMA TURBINA EÓLICA

Em condições ideais, a máxima extração da energia que cruza um rotor é obtida quando a velocidade na esteira do rotor é igual a 1/3 da velocidade não perturbada. Nessas condições, o valor máximo da energia captada pelo rotor é limitado pela eficiência de Betz, que fornece um coeficiente de potência igual a 0,593. Em outras palavras, no máximo 59,3% da energia contida no fluxo de ar pode ser, teoricamente, extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz este valor. O fato de que o rotor eólico funciona em uma faixa limitada de velocidade de vento também contribui para reduzir a energia por ele captada, pois o rotor só começa a operar a partir de sua velocidade de entrada (necessária para vencer algumas perdas), e deixa de operar quando atinge sua velocidade de corte (mecanismo de proteção para evitar danos físicos ao rotor e à sua estrutura). Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas relacionadas com cada componente (transmissão, caixa multiplicadora e gerador).

Nas turbinas do tipo HAWT, a velocidade de rotação ótima do rotor varia com a velocidade do vento e o rendimento máximo da turbina ocorre a uma dada velocidade do vento, chamada de velocidade de projeto ou velocidade nominal, diminuindo para velocidades diferentes desta. Ao se projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada, supõe-se que a operação da turbina ocorra no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação à curva de potência disponível do vento local. Como uma primeira aproximação, o rendimento global de um sistema eólico simples pode ser estimado em 20%.

3. A ROTAÇÃO DA ESTEIRA

O ar que passa através do rotor de uma turbina do tipo HAWT adquire um movimento de rotação, como pode ser visto na Fig. (1). Esta energia rotacional do fluido na esteira do rotor não produz potência útil e, sendo assim, deve ser interpretada como uma perda adicional. Esta esteira forma uma hélice a jusante do rotor, cujo raio, inicialmente igual ao do rotor, vai aumentando gradualmente. Nesta análise, a hélice é considerada de raio constante e igual ao raio R do rotor (Burton et al., 2002). Em função dessas características do escoamento na esteira do rotor, pode-se definir o fator de indução axial, $a \equiv (V_1 - V_2)/V_1$, que relaciona a velocidade axial antes e após o rotor, V_1 e V_2 respectivamente, e o fator de indução rotacional, $a' \equiv \omega/2\Omega$, que relaciona a velocidade angular do rotor, Ω , com a velocidade angular da esteira, ω . Estas velocidades estão indicadas na Fig. (2).

Um importante parâmetro do rotor é a razão de velocidades global, definida como $\lambda \equiv \Omega R/U$, onde U é a velocidade do escoamento incidente. Este parâmetro é obtido ao se fazer $r = R$ na expressão que define a razão de velocidades local, $\lambda_r \equiv \Omega r/U$, sendo r uma posição radial qualquer da pás do rotor. Assim, estas duas expressões podem ser combinadas para relacionar λ e λ_r , isto é,

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R}. \quad (1)$$



Figura 1 – Formação da rotação na esteira para uma turbina de diâmetro de 10 m, visualizada com fumaça (Dahl *et al.*, 1999).

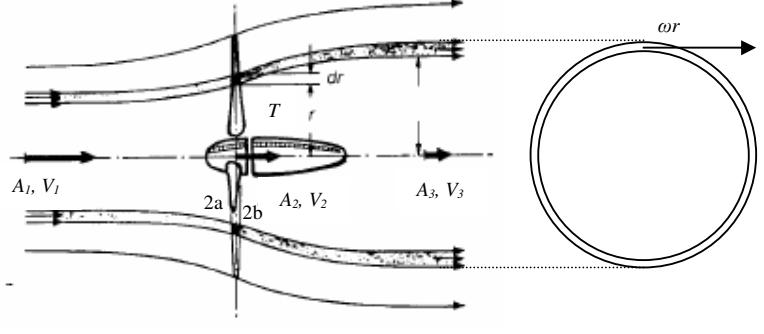


Figura 2 – Modelo do anel circular com rotação da esteira.

Considerando o rotor como um disco fino de área A que extrai energia do escoamento de ar, que possui massa específica ρ , e calculando o balanço de energia para um anel circular do disco (Fig. 2), obtém-se a parcela de potência extraída por este anel

$$dP = \frac{1}{2} \rho A U^3 a' (1-a) \frac{8}{\lambda^2} \lambda_r^3 d\lambda_r. \quad (2)$$

Integrando a Eq. (2) sobre todo o disco, considerando a energia total disponível no escoamento e relacionando a , a' , e λ , é possível determinar a seguinte expressão para o coeficiente de potência

$$C_{P_{\max}} = \frac{8}{729 \lambda^2} \left[\frac{64}{5} \zeta^5 + 72 \zeta^4 + 124 \zeta^3 + 38 \zeta^2 - 63 \zeta - 12 \ln \zeta - 4 \zeta^{-1} \right]_{\zeta=(1-3a_2)}^{\zeta=0.25}. \quad (3)$$

Onde ζ é uma variável de integração e a_2 o limite máximo de a (Manwell *et al.*, 2001). Portanto é possível notar na Fig. (3) a diferença entre o coeficiente de potência máximo obtido considerando a rotação da esteira, Eq. (3), e o valor teórico ideal simplificado, $C_P = 0,593$.

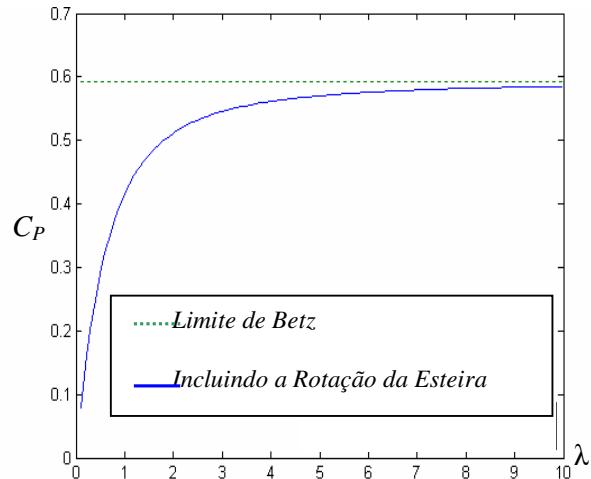


Figura 3 – Coeficiente de potência máximo

4. CÁLCULO DA FORÇA DE SUSTENTAÇÃO SOBRE AEROFÓLIOS FINOS BIDIMENSIONAIS

O modelo para aerofólios finos se baseia nas seguintes hipóteses (Bertin e Smith, 1998): as características de sustentação antes do estol não são afetadas pela viscosidade; o aerofólio trabalha em pequenos ângulos de ataque (até 10°); a espessura máxima do aerofólio é de 15% da sua corda c ; a curvatura máxima é 4% da corda. Este escoamento pode ser analisado através da superposição de linhas de vorticidade com intensidade $\gamma(x)$, em uma estação x da corda do aerofólio, distribuída sobre um comprimento infinitesimal ds da linha de curvatura do aerofólio, como mostrado na Fig. 4.

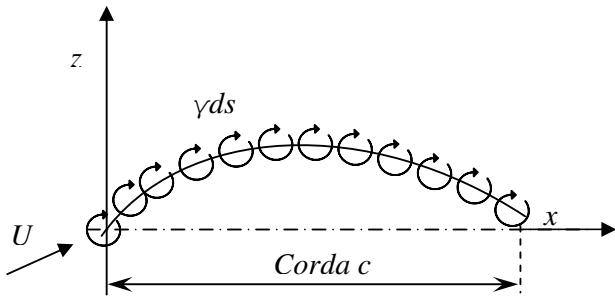


Figura 4 – Distribuição de vorticidade.

A circulação total, Γ , em torno do aerofólio é dada por

$$\Gamma = \int_0^c \gamma(s) ds. \quad (4)$$

A velocidade normal à linha de curvatura $z(x)$ do aerofólio, no ponto $(x, z(x))$ induzida por cada vórtice de abscissa ξ contribui, juntamente com U , que faz um ângulo de ataque α com a linha da corda, de acordo com a seguinte equação integral

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^c \frac{\gamma(\xi)}{(x - \xi)} d\xi = U \left(\alpha - \frac{dz}{dx} \right). \quad (5)$$

Através de uma transformação trigonométrica de variáveis [$\xi = 1/2(1 - \cos \theta)$] (Bertin e Smith, 1998), a Eq. (5) pode ser resolvida sujeita à condição de Kutta $\gamma(\pi) = 0$. A solução é

$$\gamma(\theta) = 2U \left[A_0 \frac{1 + \cos \theta}{\sin \theta} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta) \right]. \quad (6)$$

A partir da curva que descreve a linha média de curvatura $z(x)$ e as Eqs. (5) e (6), os coeficientes da distribuição de vorticidade e, consequentemente, a circulação em torno do aerofólio estão completamente determinados. Sendo assim, é possível calcular os parâmetros aerodinâmicos do aerofólio em função destes coeficientes. O coeficiente de sustentação, C_l , é obtido a partir de sua definição e do teorema de Kutta-Joukowski, o que permite escrever

$$C_l = \frac{2}{\rho U^2 c} \int_0^c \rho U \gamma(\xi) d\xi = \frac{1}{U c} \int_0^c \gamma(\xi) d\xi. \quad (7)$$

Utilizando a Eq. (6) e a mesma substituição de variáveis, obtém-se

$$C_l = 2\pi \left(A_0 + \frac{A_1}{2} \right). \quad (8)$$

Devido à ortogonalidade das funções seno e cosseno, o coeficiente de sustentação é determinado apenas pelos dois primeiros termos da série que representa a circulação em torno do aerofólio, como mostra a Eq. (8). Para os aerofólios utilizados nas pás de turbinas eólicas deste trabalho, o coeficiente de sustentação é calculado pela Eq. (8) e o coeficiente de arrasto é suposto ser nulo.

5. EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO PARA O ROTOR EÓLICO, INCLUINDO A ROTAÇÃO DA ESTEIRA

A chamada BEM (*Blade Element Theory*) expressa a força exercida sobre as pás da turbina em função dos coeficientes de arrasto e sustentação sobre o perfil da pá, assim como o ângulo de ataque. A pá é dividida em N seções, cada uma posicionada a uma distância r do centro do rotor, com uma corda c e largura dr . O vetor velocidade relativa é a soma vetorial da velocidade do escoamento incidente no rotor, $V_2 = U(1-a)$, com a adição da velocidade de rotação da pá numa seção posicionada a uma distância r do centro do rotor, Ωr , e da velocidade induzida pela esteira, $\omega r/2$, obtida da equação de conservação da quantidade de movimento angular. Sendo assim, pode-se escrever para a soma da velocidade do escoamento no plano do rotor

$$\Omega r + (\omega/2)r = \Omega r + \Omega a' r = \Omega r(1 + a'). \quad (9)$$

Utilizando o diagrama da Fig. (5) e a Eq. (2), é possível exprimir a contribuição de cada anel de um rotor com B pás para o torque dQ e para o empuxo dT ,

$$dQ = F\sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r^2 dr, \quad (10)$$

$$dT = F\sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) r dr, \quad (11)$$

onde σ' , a solidez local, é definida por $\sigma' \equiv Bc/(2\pi r)$ e φ é o ângulo entre a velocidade relativa e o plano de rotação das pás. Dentre uma variedade de métodos propostos para descrever as perdas na extremidade das pás, o Fator de Perda de Prandtl, F , é considerado o mais adequado (Manwell *et al.*, 2001), sendo expresso por

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \exp \left[- \frac{\frac{B}{2} \left(1 - \frac{r}{R} \right)}{\frac{r}{R} \sin \varphi} \right] \right\}. \quad (12)$$

Algumas relações podem ser obtidas pela geometria da Fig.(5), a saber:

$$\text{pelo } \sin \varphi: \frac{a'}{1-a} = \sigma' \frac{C_l}{4F\lambda_r \sin \varphi}; \quad \frac{a}{1-a} = \sigma' \frac{C_l \cos \varphi}{4F \sin^2 \varphi}; \quad (13a,b)$$

$$\text{pelas Eqs. (13a) e (13b): } C_l = 4F \sin \varphi \frac{\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi}{\sigma' (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi)}; \quad (14)$$

$$\text{pelo cos}\varphi: \frac{a'}{1+a'} = \sigma' \frac{C_l}{4F \cos \varphi}; \quad (15)$$

$$\text{resolvendo para } a \text{ e } a': a = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma' C_l \cos \varphi} \right]}, \quad a' = \frac{1}{\left[\frac{4F \cos \varphi}{\sigma' C_l} - 1 \right]}. \quad (16a,b)$$

A velocidade relativa também deve ser reescrita incluindo o fator de perda F como se segue

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \varphi} = \frac{U}{\frac{C_l \sigma'}{4F} \cot \varphi + \sin \varphi}. \quad (17)$$

Uma outra correção, proposta por Glauert (Manwell *et al.*, 2001), considera que, para fatores de indução axial muito altos ($a > 0,4$), o coeficiente de empuxo deve ser calculado pela relação empírica determinada pelo próprio Glauert e dada por

$$a = \frac{1}{F} \left[0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427(0.889 - C_T)} \right]. \quad (18)$$

Esta equação é válida para $a > 0,4$, ou equivalentemente, para $C_T > 0,96$. Para os demais valores de a , deve ser utilizada a equação da teoria de conservação de momento angular.

Avaliando novamente o coeficiente de potência para a turbina

$$C_p = \frac{\int_{r_o}^R \Omega dQ}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3}, \quad (19)$$

sendo que r_o é a distância em relação ao centro do rotor de onde se inicia o cálculo aerodinâmico. Nesta equação, $r_o = 0.15R$ porque, fora o próprio raio do nacelle, a parte inicial da pá possui função unicamente estrutural, não contribuindo significativamente com as forças aerodinâmicas. Substituindo a Eq. (10) na Eq. (19), assim como as relações geométricas encontradas a partir da Fig. (5), pode-se escrever a seguinte expressão para o coeficiente de potência

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_o}^{\lambda} \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left(1 - \frac{C_d}{C_l} \cot \varphi \right) \lambda_r^2 d\lambda_r. \quad (20)$$

Esta equação pode ser utilizada para avaliar o desempenho do rotor.

6. GEOMETRIA DO ROTOR PARA COEFICIENTE DE POTÊNCIA MÁXIMO

O coeficiente de potência do rotor é máximo quando o argumento da integral na Eq. (20) também é máximo. Desprezando o arrasto nesta equação, o fator de perda de Prandtl e maximizando esta função, pode-se obter a relação

$$\lambda_r = \sin \varphi \frac{(2 \cos \varphi - 1)}{(1 - \cos \varphi)(2 \cos \varphi + 1)}. \quad (21)$$

Manipulando as equações extraídas a partir da geometria da Fig. (5), é possível escrever outras quatro relações:

$$\varphi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right); \quad c = \frac{8\pi r}{BC_i} (1 - \cos \varphi); \quad a' = \frac{1-3a}{4a-1}; \quad a = \frac{1}{1 + \frac{4 \sin^2 \varphi}{C_i \sigma' \cos \varphi}}. \quad (22,23,24,25)$$

Estas expressões descrevem a geometria ótima de um rotor. Muitas vezes, porém, a fabricação das pás segundo esta geometria se torna complicada em demasia e é comumente utilizada uma aproximação linear para a distribuição da corda e do ângulo de torção ao longo da pá. (Manwell *et al.*, 2001). A distribuição linear da corda é empregada no programa que calcula a geometria do rotor, pois, como o trecho inicial da pá contribui com uma parcela de potência reduzida em comparação com o trecho da pá mais próximo à sua extremidade, é possível obter um rotor com coeficiente de potência semelhante e com dimensões menores através esta aproximação.

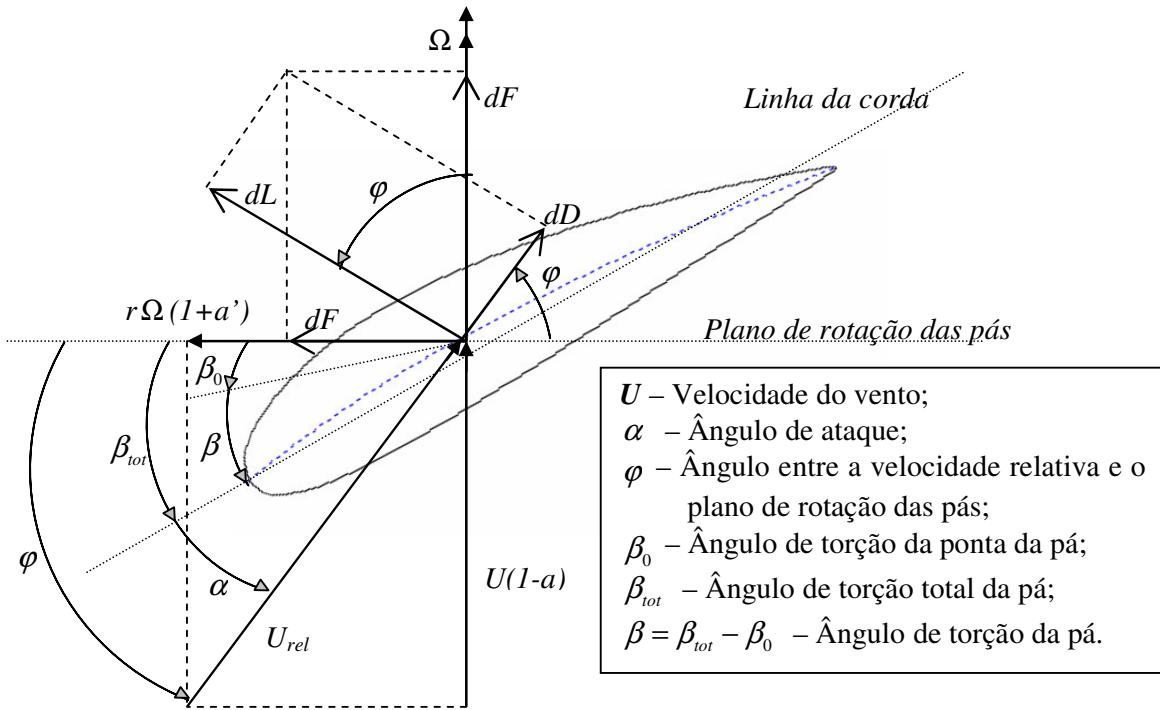


Figura 5 – Variáveis geométricas e forças sobre um elemento de pá (Manwell *et al.*, 2001).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Reunindo todas as equações apresentadas, foi desenvolvido um programa em plataforma *Matlab* (Versão 6.0, Release 12), denominado *Rotor Design*, para realizar um cálculo iterativo das variáveis mencionadas. Partindo da geometria ótima apresentada na seção anterior, pode-se determinar a configuração geométrica das pás de um rotor eólico que deve desempenhar determinada função. Para exemplificar o cálculo de um rotor, um determinado conjunto de parâmetros que caracterizam um rotor de médio porte é selecionado. Supõe-se que a eficiência dos demais componentes mecânicos do sistema eólico, tais como caixa multiplicadora e freios, é 80%. A razão de velocidades escolhida, 6, é típica para turbinas eólicas de geração de energia elétrica, conforme citado por Burton *et al.* (2002). A potência requerida é fixada em 50kW e o rotor possui 3 pás. O

perfil aerodinâmico e o coeficiente de sustentação de projeto são escolhidos conforme os resultados do programa.

Comparando os perfis NACA 4412, 2412 e 0012 quanto à performance, todos esses aerofólios fornecem resultados idênticos, pois o programa desenvolvido busca a geometria que fornece o coeficiente de potência máximo para a razão de velocidades de projeto estabelecida. Cabe ressaltar que a espessura de 12% da corda (os dois últimos dígitos) atende à hipótese de aerofólios finos (é menor que 15%) e não faz diferença no modelo utilizado, pois a espessura não é considerada na teoria de aerofólios finos. Conforme os resultados obtidos pelo programa, para um C_l de projeto igual a 0,7, o ângulo de ataque necessário é de 2,28°, para o aerofólio 4412, de 4,30°, para o 2412, e de 6,38°, para o 0012 o que mostra que é necessário um maior ângulo de ataque, quanto menor for a curvatura do aerofólio para se alcançar a mesma sustentação, conforme esperado.

A Fig. (6) mostra a diferença entre os ângulos de torção totais para os três aerofólios testados, com $C_l = 0,7$, onde é possível notar que as diferenças se reduzem apenas a uma constante, que é justamente a diferença no ângulo de torção na ponta da pá, β_0 (vide Fig. 5), entre os aerofólios.

Para o aerofólio 4412, escolhido dentre os três testados, o programa busca um C_l de projeto adequado. Após testes com os valores 0,5, 0,7 e 1,0, pode-se observar que as principais diferenças estão na dimensão da corda ao longo da pá. Como visto no gráfico da Fig. (7), quanto menor o coeficiente de sustentação de projeto, maior a corda necessária para gerar a potência requerida. Assim, poder-se-ia escolher o maior coeficiente de sustentação desta análise $C_l = 1,0$; porém, este valor se aproxima muito da região de estol, dependendo do número de Reynolds. Como a corda para o coeficiente de sustentação 0,5 foi considerada muito elevada (4,5m na base), o valor mais adequado é $C_l = 0,7$.

A tela principal do programa, desenvolvida através do pacote GUI (*Graphical User Interface*) do Matlab, pode ser vista na Fig. (8). A tela apresenta os parâmetros de entrada, os parâmetros de saída e os resultados principais calculados, definidos pela análise aqui elaborada. Nesta figura é possível ver também a opção de aproximação linear para a corda, que, neste caso, quando habilitada, altera o coeficiente de potência máximo de 0,514 para 0,509 (-1%) apenas, enquanto que a massa de cada pá é alterada de 673 para 440kg (-35%). É importante ressaltar que a curva de potência cresce indefinidamente devido ao fato de que não são considerados mecanismos comumente utilizados em turbinas eólicas, como o controle de passo ou estol.

O programa *Rotor Design* também possibilita a visualização tridimensional de uma das pás da turbina através do botão GEOMETRIA 3D, conforme mostrado na Fig. (9), onde estão representadas uma pá com corda ideal e uma pá com distribuição de corda linearizada na metade mais próxima ao centro do rotor, para o mesmo rotor estudado.

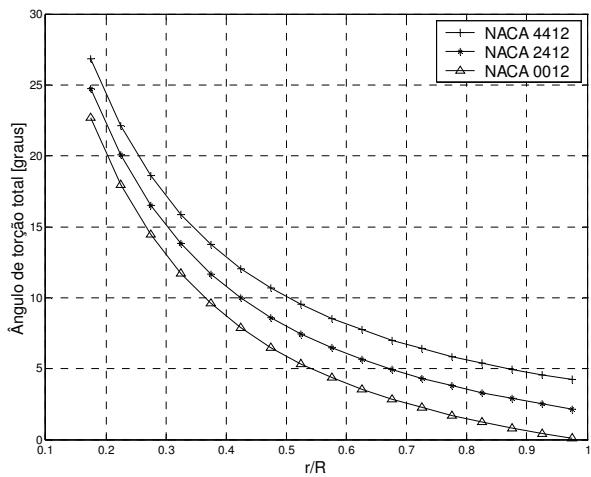


Figura 6 – Testes para escolha de perfil.

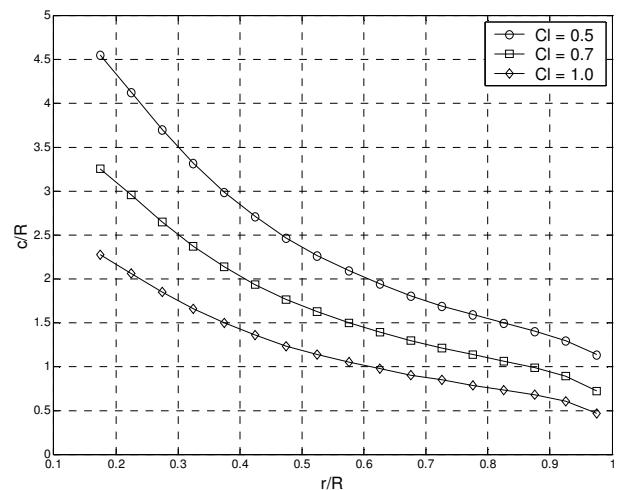


Figura 7 – Testes para escolha de C_l .

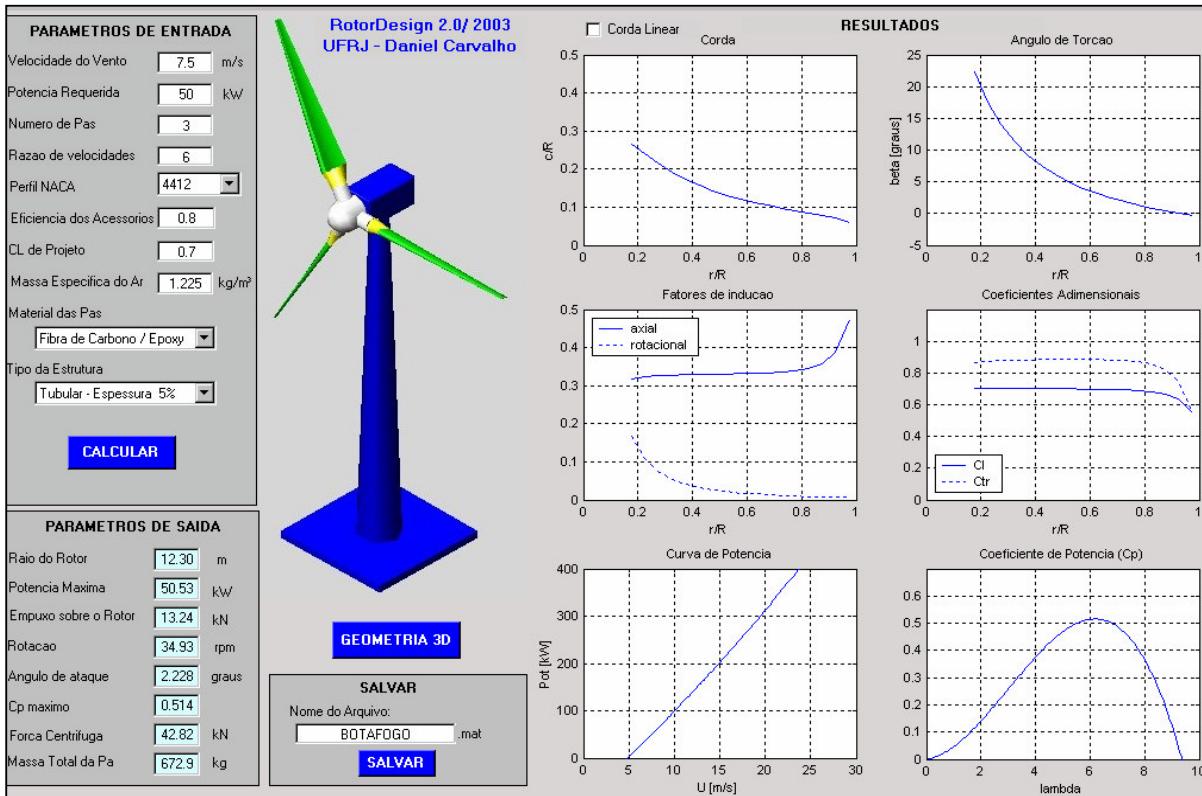


Figura 8 – A interface do programa Rotor Design.

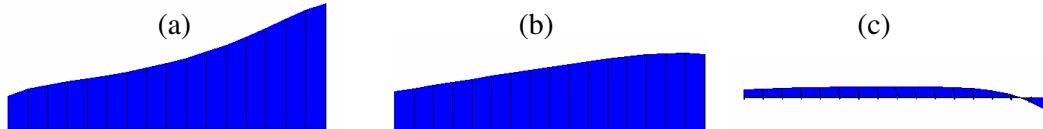


Figura 9 – Visualização da pá calculada: (a) Pá calculada para o máximo teórico; (b) Pá com ajuste linear; (c) Vista lateral, evidenciando a torção.

8. COMPARAÇÃO COM O MODELO VESTAS V47 – 660 kW

Os resultados obtidos pelo procedimento desenvolvido podem ser comparados com os dados de uma turbina real disponível no catálogo do fabricante. Para esta comparação, foi escolhida a turbina Vestas, modelo V47, de 660 kW. Embora o catálogo não forneça informações detalhadas, é possível comparar o raio, a velocidade de rotação e a potência do rotor calculado com os dados reais do modelo Vestas V47. A Tab. (1) mostra os dados de entrada e os resultados de saída obtidos, onde pode-se observar que a concordância é muito boa, considerando-se as aproximações utilizadas no modelo.

9. CONCLUSÕES

O programa de desenvolvido mostrou-se eficiente para determinar a geometria ideal para as pás de um gerador eólico de pequeno porte, assim como para fornecer uma ordem de grandeza das dimensões de projeto de um aerogerador de maior porte, tal como na comparação realizada com o modelo Vestas V47. Como melhorias para versões futuras, pode-se sugerir a implementação de diferentes perfis de aerofólios ao longo da pá e a utilização de um método mais sofisticado que a teoria de aerofólios finos para avaliar o coeficiente de sustentação, mesmo que seja um método numérico, como por exemplo, o método dos painéis.

Tabela 1 – Comparação com o Modelo Vestas V47.

ENTRADA			SAÍDA		
Parâmetro	Resultado RotorDesign	Vestas V47	Parâmetro	Resultado RotorDesign	Vestas V47
Velocidade Nominal (m/s)	15	15	Raio do Rotor (m)	20,3	23,5
Potência Requerida (kW)	680	660	Potencia Máxima (kW)	658	660
Número de Pás	3	3	Empuxo sobre o Rotor (kN)	140,8	-
Razão de Velocidades (λ)	4,6	4,6	Rotação (rpm)	32,47	28,5
Perfil NACA	4415	-	C_p Máximo	0,492	0,368
Eficiência dos Acessórios	0,5	0,5*	Ângulo de ataque de projeto (graus)	2,22	-
C_l de Projeto	0,7	-			
Massa específica do ar local	1,225 kg/m³	-			

*Valor Estimado

REFERÊNCIAS

- Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J. & Sá, A. L., 2001, “*Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*”, CEPEL.
- Bertin, J. J. & Smith, M. L., “*Aerodynamics for Engineers*”, 1998, Prentice Hall, New Jersey, Third edition.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., “*Handbook of Wind Energy*”, 2002, John Wiley & Sons, West Sussex - Inglaterra.
- Catálogo do fabricante: *Vestas Wind Systems A/S* – modelo V47-660 kW, 2002.
- Dahl, K.S., Fuglsang, P., Antoniou, I., “*Experimental Verifications of the New RISO-A1 Airfoil Family for Wind Turbines*”, Proc. of EWEC’99, 1999, pp.85-88.
- Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers, A.L., “*Wind Energy Explained, Theory, Design and Application*”, John Wiley & Sons, West Sussex - Inglaterra, 2001.

AERODYNAMIC MODELING OF THE BLADES OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES

Abstract. Motivated by the growing installation of wind energy systems all over the world and the perspectives of wind energy utilisation in Brazil, this paper presents a procedure to evaluate the optimum aerodynamic configuration for the rotor blades of a Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT). From the conservation equations and the Thin Airfoil Theory, the basic rotor geometry is determined. In the model only a limited set of geometric parameters that strongly affects the rotor aerodynamics is calculated. The program, implemented on the Matlab platform, requires the wind velocity, the output power and other auxiliary design parameters as input data. From a user friendly interface, the rotor radius is calculated and the airfoil chord and twist angle variation with the blade radius are shown graphically. Additionally some information about the rotor performance in off-design conditions is also provided. The results allow the calculation of other wind turbine components to be performed.

Keywords: Wind Energy, Wind Turbines, Aerodynamics, Airfoil, Rotor Blades.