

PREVISÃO DA POTÊNCIA DE EIXO DE UMA TURBINA EÓLICA DE DUAS PÁS

Diego Magela Lemos ⁽¹⁾ (diego.magela1@gmail.com), Caio César Silva Araujo ⁽²⁾ (caioufsj@hotmail.com), Pedro Augusto Lara El-Corab ⁽³⁾ (pedrocorab@gmail.com), Daniel Souza Sampaio ⁽⁴⁾ (daniel.sampaio@ufsj.edu.br), Cláudio de Castro Pellegrini ⁽⁵⁾ (pelle@ufsj.edu.br)

^{(1), (2), (3)} Universidade Federal de São João del-Rei (**UFSJ**) - Discente do Curso de Engenharia Mecânica

^{(4), (5)} Universidade Federal de São João del-Rei (**UFSJ**) – Departamento de Ciências Térmicas e Fluidos - Praça Frei Orlando, 170 - São João del-Rei

RESUMO: *Formas de se obter energia limpa e renovável vêm sendo cada vez mais pesquisadas e estudadas. O campo da energia eólica mostra-se bastante promissor. O presente trabalho avalia uma metodologia para previsão da potência de eixo gerada por uma turbina baseada no método Blade Element Momentum. Coeficientes aerodinâmicos bidimensionais dados por simulações com o software XFOIL, assim como dados experimentais foram utilizados para alimentar o algoritmo BEM. Usaram-se correções para a perda de ponta (Prandtl's Tip Loss) causada pela geração de vórtices pela ponta da pá, correção de Spera para corrigir a indução axial e correção para efeitos rotacionais 3D devido à separação do escoamento e influências das forças de Coriolis e centrífugas. As previsões foram comparadas com resultados obtidos experimentalmente para uma turbina com duas pás. Conclui-se que o método é eficaz quando se necessita prever a potência de eixo de uma turbina eólica, desde que sejam usados corretamente os coeficientes aerodinâmicos.*

PALAVRAS-CHAVE: *Energia Eólica, Blade Element Momentum, Turbina eólica, Potência de eixo.*

1. INTRODUÇÃO

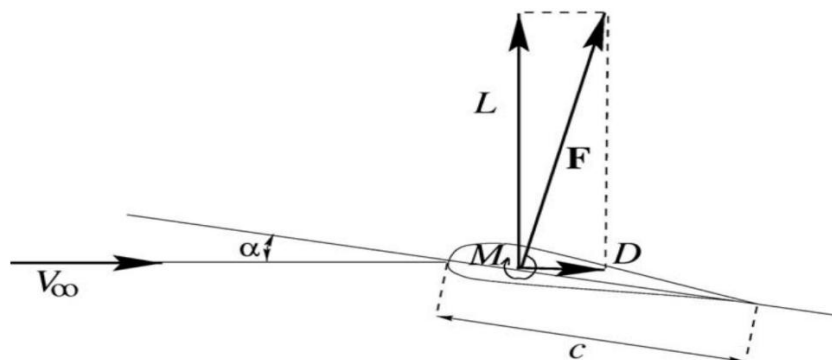
A geração de energia elétrica por meio da utilização da energia contida nos ventos, como fonte alternativa e renovável, está sendo cada vez mais disseminada no mundo, aumentando assim a busca pelo aprimoramento tecnológico das turbinas eólicas.

Godreau, Caldeira e Campos (2014) usaram o código FAST, desenvolvido pelo NREL baseado no método BEM para prever o desempenho da turbina NREL de 10 m diâmetro, conseguindo resultados razoáveis comparados aos resultados experimentais. Yelmule e VSJ (2013) utilizam um método CFD, ANSYS CFX, conseguindo-se resultados muito coerentes. Duque, Burklund e Johnson (2003) utilizam dois códigos computacionais, OVERFLOW-D2 e CAMRAD-II, obtendo ótimos resultados adotando o código OVERFLOW-2D e algumas divergências com o código CAMRAD-II. Na literatura muito se usa códigos já implementados para a previsão da performance de uma turbina, nesse trabalho foi programado uma metodologia descrita em Hansen (2008) com o objetivo de avaliar essa metodologia e acurácia na previsão da potência.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aerodinâmica das pás

O ar, ao escoar sobre o aerofólio, faz com que o aerofólio experimente uma força resultante F , conforme ilustrado na Figura 1. Essa força é resultante de duas forças que agem simultaneamente no aerofólio, sendo que essas forças podem variar de magnitude de acordo com parâmetros como a velocidade não perturbada, V_∞ , e a geometria do aerofólio. Uma componente dessa força é a força de arrasto, D , definida como a força paralela à direção do vento relativo. A outra componente dessa força é a sustentação, L , definida como a força perpendicular ao movimento relativo. A força resultante F , é causado pela diferença de pressão do intradorso, região inferior, e o extradorso, região superior (HANSEN, 2015).



2

FIGURA 1. Definição da força de sustentação (L) e a força de arrasto (D) (Fonte: Hansen, 2008)

Os coeficientes de arrasto, C_D , e de sustentação, C_L , são definidos de acordo com as Equações 1 e 2.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 c} \quad (1)$$

e

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 c} \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica e c é a corda do aerofólio. Os coeficientes C_D e C_L , apresentados nas Equações 1 e 2, dependem basicamente do ângulo de ataque α e o número de Reynolds, Re . O ângulo de ataque, α é definido como o ângulo entre a linha de corda e a velocidade relativa do vento. O número de Reynolds é baseado na corda e na velocidade no infinito:

$$Re = \frac{cV_\infty}{\nu} \quad (3)$$

onde ν é a viscosidade cinemática.

2.1.2 Turbina eólica ideal

A hipótese de uma turbina eólica ideal considera o disco, área ocupada pelo rotor, sem atrito e que não há a componente rotacional da velocidade na esteira. A turbina eólica extrai energia mecânica da energia cinética contida no vento e o disco do rotor age como um dispositivo de arrasto, reduzindo a velocidade do vento, V_o , a uma velocidade u no plano do rotor até a velocidade u_1 na esteira, após passar pelo rotor, como mostra a Figura 3.

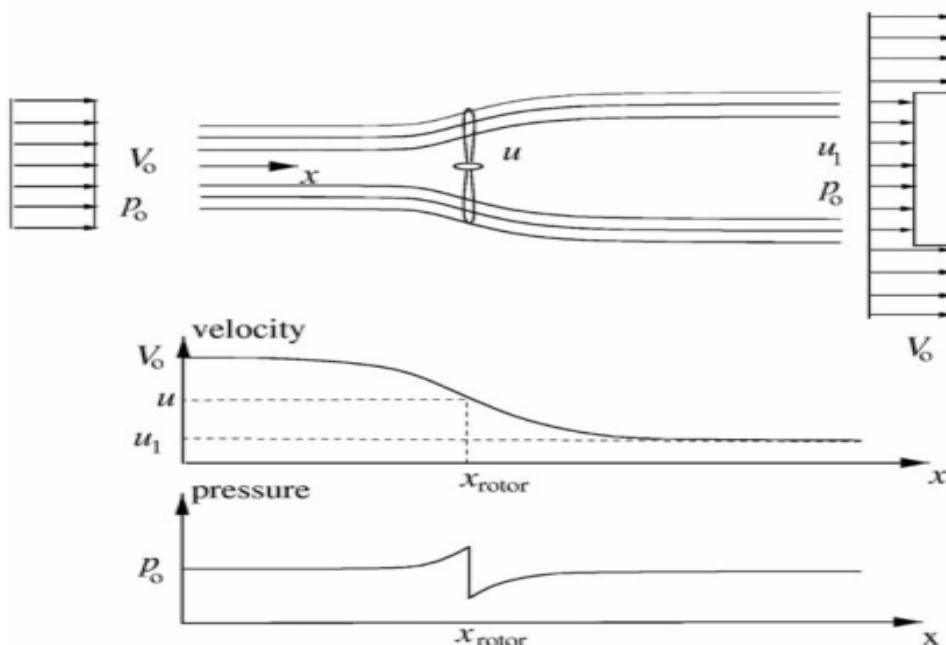


FIGURA 2. Variação da velocidade axial e pressão antes e depois do rotor (Fonte: Hansen, 2008)

Pela Figura 2, pode-se observar que anterior e posteriormente ao rotor a pressão é p_o , pressão atmosférica, e no rotor há uma variação de pressão Δp . A força de impulso T , é resultado da variação de pressão no rotor e no sentido das linhas de corrente.

$$T = \Delta p A \quad (4)$$

Na Equação 4, A representa a área ocupada pelo rotor. Pelas hipóteses assumidas de uma turbina eólica e assumindo um escoamento incompressível, pode-se aplicar a equação de Bernoulli em uma linha de corrente do escoamento logo antes e logo posterior ao rotor.

$$p_o + \frac{1}{2} \rho V_o^2 = p + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (5)$$

e

$$p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho u^2 = p_o + \frac{1}{2} \rho u_1^2 \quad (6)$$

Nas Equações 5 e 6, p representa a pressão no rotor. Combinando as Equações 5 e 6, define-se a expressão para Δp , de acordo com a Equação 7.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_o^2 - u_1^2) \quad (7)$$

A Figura 3 mostra um volume de controle em volta da turbina eólica. Considerando uma turbina ideal e aplicando a equação da quantidade de movimento na direção axial, resulta-se numa expressão, Equação 8, para o impulso T .

$$T = \rho u A (V_o - u_1) \quad (8)$$

Combinando as Equações 4 e 8, a velocidade no rotor, u , pode ser definida.

$$u = \frac{1}{2} (V_o + u_1) \quad (9)$$

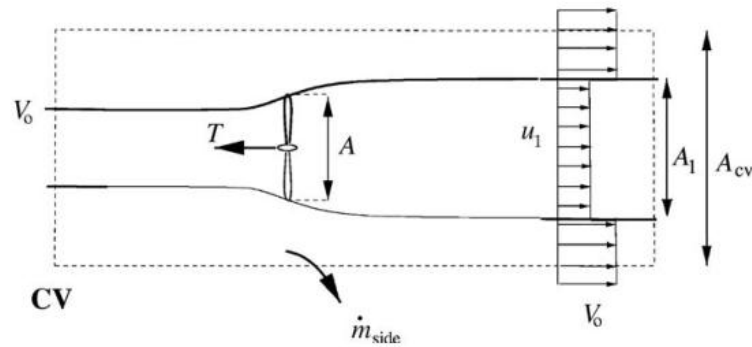


FIGURA 3. Volume de controle em volta da turbina eólica (Fonte: Hansen, 2008)

Na Figura 3 \dot{m}_{side} representa o fluxo de massa, A_1 a área após o rotor, na esteira, e A_{CV} a área do volume de controle. Um volume de controle alternativo ao primeiro pode ser considerado, como pode ser visto na Figura 4.

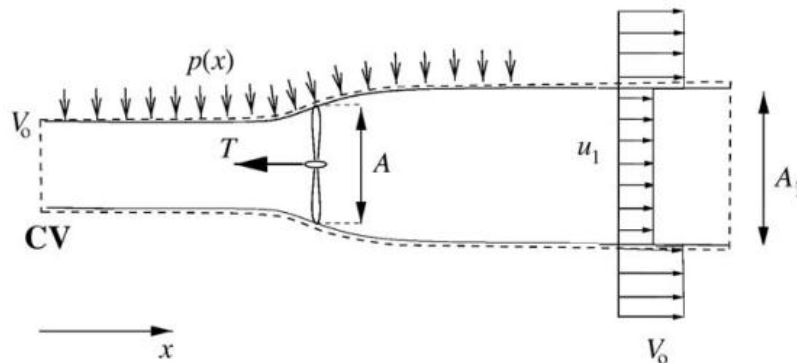


FIGURA 4. Volume de controle alternativo (Fonte: Hansen, 2008)

Pela Figura 4, $p(x)$ representa a distribuição de pressões ao longo do volume de controle. Usando a equação da conservação de energia para um volume de controle da Figura 4, a potência de eixo pode ser definida de acordo com a Equação 10.

$$P = \frac{1}{2} \rho u A (V_o^2 - u_1^2) \quad (10)$$

O fator de indução axial, a , é definido como:

$$u = (1 - a)V_o \quad (11)$$

Combinando as Equações 11 e 9, pode-se definir uma equação para a velocidade na esteira, u_1 :

$$u_1 = (1 - 2a)V_o \quad (12)$$

Dessa forma, podem-se substituir as Equações 11 e 12 nas Equações 8 e 10, resultando em:

$$P = 2\rho V_o^2 a(1 - a)A \quad (13)$$

e

$$T = 2\rho V_o^2 a(1 - a)A \quad (14)$$

A potência disponível em um corte transversal igual à área varrida pelo rotor é:

$$P_{disponível} = \frac{1}{2} \rho A V_o^3 \quad (15)$$

Assim pode ser definido o coeficiente de pressão e de impulso:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_o^3 A} \quad (16)$$

e

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_o^2 A} \quad (17)$$

onde P , na Equação 16 e T na Equação 17 foram definidos nas Equações 13 e 14, respectivamente. Diferenciando a Equação 16 em relação a a , encontra-se o valor máximo de

$C_{p,máx} = 16/27$ para $a = 1/3$. Este valor máximo teórico para uma turbina eólica ideal é conhecido como o limite de Betz.

2.2 BLADE ELEMENT MOMENTUM

O Blade Element Momentum (BEM) é um método capaz de calcular os carregamentos, o impulso T e também a potência de eixo para diferentes configurações da velocidade do vento, V_o e velocidade de rotação. Para isso o rotor é discretizado em vários elementos diferenciais anulares. Algumas hipóteses são consideradas:

- Independência radial: o que acontece em um elemento diferencial não pode ser sentido pelos outros.
- A força das pás no escoamento incidente é constante em cada elemento diferencial, correspondendo a um rotor com infinitas pás.

A velocidade sentida por cada seção da pá é a velocidade relativa, V_{rel} , como mostra a Figura 4, é uma combinação da velocidade axial, $V_o(1-a)$ e à velocidade tangencial, $(1+a')\omega r$, onde a' é o fator de indução radial e ω a velocidade angular do rotor.

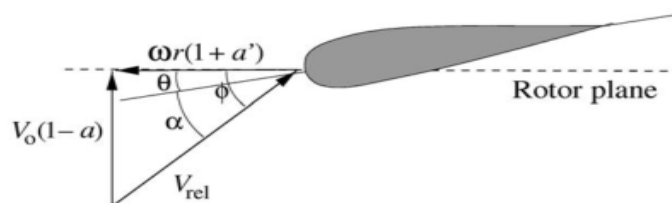


FIGURA 5. Velocidade em uma seção da pá (Fonte: Hansen, 2008)

O ângulo θ é definido como ângulo de torção local, que é o ângulo entre a corda e o plano do rotor, ϕ é definido como ângulo entre o plano do rotor e a velocidade relativa e α é definido com ângulo de ataque, que é o ângulo compreendido entre a velocidade relativa e a linha da corda. O ângulo ϕ e α podem ser calculados de acordo com a Figura 5, mostrado nas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$\operatorname{tg}(\phi) = \frac{(1-a)V_o}{(1+a')\omega r} \quad (18)$$

e:

$$\alpha = \phi - \theta \quad (19)$$

A velocidade sentida em cada seção é a velocidade relativa. Desse modo, as forças de arrasto e sustentação, bem como o número de Reynolds, são calculadas em relação a velocidade relativa da seção. Assim, essas forças podem ser calculadas de acordo com as Equações 1 e 2, e o número de Reynolds podem ser definidos como:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_L \quad (20)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_D \quad (21)$$

e:

$$Re = \frac{c V_{rel}}{\nu} \quad (22)$$

As forças normal e tangencial no plano do rotor são as forças de interesse. Essas forças podem ser derivadas decompondo as forças de arrasto e de sustentação, de acordo com a Figura 6.

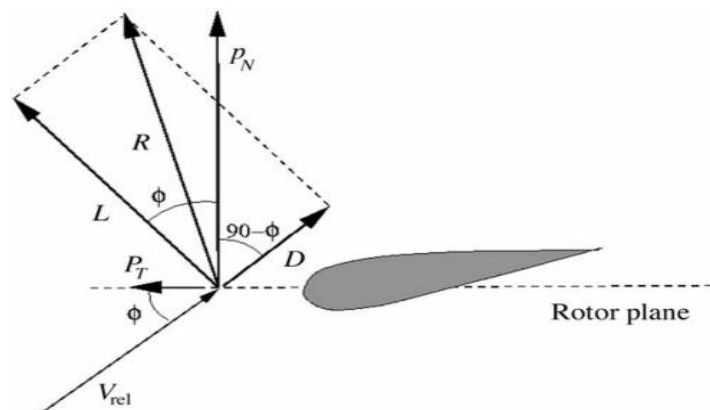


FIGURA 6. Forças em uma seção da pá (Fonte: Hansen, 2008)

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (23)$$

e:

$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (24)$$

A força p_T é paralela ao plano do rotor, que promove a rotação do rotor, p_N é a força perpendicular ao plano do rotor e R a força resultante das forças L e D . Normalizando as Equações 23 e 24 em relação a $\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c$ resultam:

$$C_N = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (25)$$

e:

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (26)$$

onde:

$$C_N = \frac{P_N}{\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c} \quad (27)$$

e:

$$C_t = \frac{P_T}{\frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c} \quad (28)$$

Pela Figura 6 é visto pela geometria que:

$$V_{rel} \sin \phi = V_o (1 - a) \quad (29)$$

e

$$V_{rel} \cos \phi = V_o (1 + a') \quad (30)$$

Definindo uma solidez σ como sendo a fração da área do rotor que é coberto pelas pás, pela Equação 31:

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (31)$$

onde B denota o número de pás e $c(r)$ é a corda na posição radial r . Como p_N e p_T são forças por unidade de comprimento, a força normal e o torque em um volume de controle de comprimento dr são:

$$dT = Bp_N dr \quad (32)$$

e:

$$dM = rBp_T dr \quad (33)$$

Usando a Equação 27 para p_N e a Equação 29 usada para V_{rel} , a Equação 32 torna-se:

$$dT = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_o^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_N dr \quad (34)$$

De modo similar, usando a Equação 28 para p_T e as Equações 29 e 30 usadas para V_{rel} , a Equação 33 torna-se:

$$dM = \frac{1}{2} \rho B \frac{V_o (1-a) \omega r (1+a')}{\sin \phi \cos \phi} c C_T r dr \quad (35)$$

Desde que o diferencial da área do corte transversal do rotor do volume de controle no plano do rotor é:

$$dA = 2\pi r dr \quad (36)$$

Diferenciando a Equação 8 em relação a A , definido a Equação 36, tem-se:

$$dT = 2\pi r \rho u (V_o - u_1) dr \quad (37)$$

Introduzindo a Equação 12 na Equação 33, pode-se escrever:

$$dT = 4\pi r \rho V_o^2 a (1-a) dr \quad (38)$$

Definindo a componente rotacional da velocidade como sendo nula anterior ao rotor e $C_\theta = 2a' \omega r$ na esteira. Usando a Equação 11 e a equação de Euler para turbina, pode-se definir:

$$dM = 4\pi r^3 \rho V_o \omega (1-a) a' dr \quad (39)$$

Igualando as Equações 34 e 38, igualando-se também as Equações 35 e 39, juntamente com a Equação 31, podem-se definir as expressões para os fatores indução axial e radial:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1} \quad (40)$$

e:

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (41)$$

2.3 Correções para o BEM

2.3.1 Perda de ponta (Prandtl's tip loss fator)

Uma das maiores limitações do método original BEM é a desconsideração da influência dos vórtices criados pela ponta das pás no campo de velocidades induzidas na esteira. Esses vórtices de ponta criam múltiplas estruturas na esteira, desempenhando um papel importante no campo de velocidades no rotor (HANSEN, 2015). A teoria foi primeiramente desenvolvida por Prandtl, como pode ser visto em Glauert (1935). Essa teoria se resume em um fator de correção para o campo de velocidades induzidas, F :

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (42)$$

onde:

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{2r \sin \phi} \quad (43)$$

Esse fator de correção é usado para modificar as Equações 38 e 39, que conseqüentemente altera as Equações 40 e 41, podendo-se definir novas expressões para os fatores de indução axial e radial:

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_N} + 1} \quad (44)$$

e:

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (45)$$

2.3.2 Correção de Spera

Quando o fator de indução axial se torna maior do que 0,5, de acordo com a Equação 12, um fluxo reverso ocorreria, o que é fisicamente impossível. O que acontece é uma maior entrada de fluxo de fora devido ao aumento da turbulência. Spera (1994) desenvolveu relações empíricas para o valor de coeficiente de impulso C_T que recalcula o valor de a quando se torna maior do que $a_c = 0,2$.

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)F & a \leq a_c \\ 4(a_c^2 + (1-2a_c)a)F & a > a_c \end{cases} \quad (46)$$

onde F é o fator de perda de ponta de Prandtl. Quando $a > a_c$ o fator de indução pode ser calculado igualando a Equação 46 a Equação 17 e usando dT de acordo com a Equação 34, obtém-se:

$$a = \frac{1}{2} \left[2 + K(1-2a_c) - \sqrt{K(1-2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \quad (47)$$

onde:

$$K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma C_N} \quad (48)$$

2.3.3 Efeitos rotacionais 3D

Devido à rotação do rotor, a camada limite está sujeita a forças de Coriolis e forças centrífugas que alteram as características 2D do aerofólio. Isso é especialmente pronunciado no estol, que indica a separação do fluxo e perda de sustentação devido ao decréscimo dos valores do coeficiente de sustentação. Desse modo é necessário extrapolar os valores dos coeficientes de sustentação e de arrasto para incluir esses efeitos.

$$C_{x,3D} = C_{x,2D} + a(c/r)^h \cos^n(\beta) \Delta C_x, \quad x = L, D \quad (49)$$

c é a corda, r é a distância radial ao eixo de rotação e β é a torção. Na Equação 44 L e D denotam sustentação (*lift*) e o arrasto (*drag*), respectivamente.

$$\Delta C_l = C_{L,inv} - C_{L,2D} \quad (50)$$

$$\Delta C_d = C_{D,2D} - C_{D,2D-\min} \quad (51)$$

onde $C_{L,inv}$ denota o coeficiente de sustentação de um escoamento potencial, sem nenhuma separação, $C_{L,2D}$ e $C_{D,2D}$ denotam, respectivamente, o coeficiente de sustentação e arrasto de simulações 2D e $C_{D,2D-\min}$ denota o valor mínimo do coeficiente de arrasto das simulações 2D. De acordo com Chaviaropoulos e Hansen (2000), os valores de a , h e n são 2,2, 4 e 1, respectivamente.

3. METODOLOGIA

Como foi dito na Introdução, o objetivo deste trabalho é estimar a potência de eixo de uma turbina. Para que isso fosse possível, usou-se o método Blade Element Momentum e exigiu-se que o método fosse validado a partir de resultados experimentais feitos pela NREL em 2011 (National Renewable Energy Laboratory), com uma turbina eólica de duas pás, denominado Phase VI.

3.1 Experimento prático Phase VI

O principal objetivo do experimento Phase VI foi o de fornecer informações necessárias para mensurar, em escala real, o comportamento tridimensional de turbina eólica de duas pás de eixo horizontal. Este experimento foi feito utilizando um túnel de vento com seção de 24.4 metros x 36.6 metros, capaz de acomodar uma turbina eólica de 10 metros de diâmetro. Esta turbina regulada é pelo estol, tem uma potência nominal de 25 kW, girando a 72 rpm e a altura do seu cubo é de 12,2 metros. Ela contém duas pás torcidas que vão afunilando da raiz para a ponta.

O perfil do aerofólio desta turbina é o S809, perfil desenvolvido com o objetivo de alcançar um máximo coeficiente de sustentação e obter baixos coeficientes de arrasto (SOMERS, 1997). Com um perfil de 21 % a espessura da corda, fluxo laminar e projetado especificadamente para turbinas eólicas de eixo horizontal.

3.2 Coeficientes aerodinâmicos 2D e validação do código

Com as equações mostradas acima, é possível aplicar o algoritmo para calcular todas as forças agindo em cada seção da pá, seguindo a hipótese de que cada seção é independente da outra.

- (1) Declarar um valor inicial para a e a' , normalmente é considerado $a = a' = 0$, definido pela literatura como condição inicial para o método.
- (2) Calcular o ângulo ϕ usando a Equação 18
- (3) Calcular o ângulo de ataque α usando a Equação 19
- (4) Buscar na base de dados os valores de $C_L(\alpha)$ e $C_D(\alpha)$ de acordo com o número de Reynolds, Equação na seção que está sendo calculado
- (5) Calcular o valor de C_N e C_t usando as Equações 25 e 26
- (6) Calcular o valor de a e a' usando as Equações 44 e 45. Se a e a' forem maiores que a tolerância definida, volta para (2), caso contrário finalizar
- (7) Calcular as forças locais na seção da pá

Os coeficientes aerodinâmicos necessários para alimentar o BEM foram simulados no software de código aberto *XFOIL*. O *XFOIL* é um *software* que usa o método dos painéis 2D incluindo os efeitos viscosos. A partir das simulações feitas no *XFOIL* foi montada uma base de dados contendo os valores de C_L , C_D e α para vários números de Reynolds com a finalidade de alimentar o BEM, até a máxima convergência dos resultados. Para seções onde houve uma baixa convergência dos ângulos de ataque, Reynolds acima de 7×10^5 , de acordo com exigências de ângulo de ataque para determinada seção, foi repetido o último valor dos coeficientes de sustentação e arrasto.

Usaram-se também os dados experimentais dos coeficientes de sustentação e arrasto contidos em Somers (1997), que começam a partir de $Re = 1 \times 10^6$. Sendo assim, foram mesclados os valores simulados pelo *XFOIL* para Reynolds menores que 1×10^6 com os valores experimentais. Devido ao máximo valor do coeficiente de sustentação experimental se limitar a 20° , também foram extrapolados os dados repetindo os últimos valores dos coeficientes de sustentação e arrasto até o maior valor de ângulo de ataque exigido na seção.

Após seguir o algoritmo e definir as forças agindo em cada seção, foi feita uma integração numérica para que o torque no eixo na turbina fosse calculado e posteriormente comparado à potência calculada com os dados experimentais. A força tangencial por comprimento $p_{T,i}$ é conhecida em cada segmento depois de prosseguido o algoritmo descrito acima. Considerou-se uma variação linear entre r_i e r_{i+1} , como mostra a Figura 7.

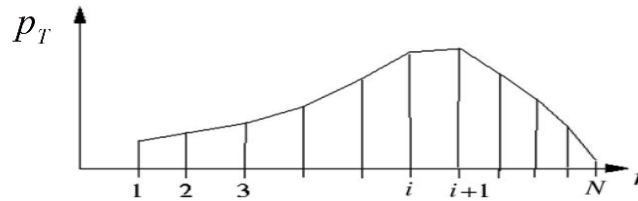


FIGURA 7. Variação linear da força tangencial para diferentes posições radiais subsequentes (Fonte: Hansen, 2008)

onde N denota quantidade de seções consideradas ao longo da pá e p_T a força tangencial no plano do rotor. Assim, a força p_T entre r_i e r_{i+1} pode ser expressa por uma reta de acordo com a Equação 52.

$$p_T = A_i r + B_i \quad (52)$$

onde:

$$A_i = \frac{p_{T,i+1} - p_{T,i}}{r_{i+1} - r_i} \quad (53)$$

e:

$$B_i = \frac{p_{T,i+1} r_{i+1} - p_{T,i} r_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (54)$$

Usando a Equação 33, introduzindo as equações 53 e 54 na Equação 52 e substituindo no valor de p_T , posteriormente integrando-a entre r_i e r_{i+1} , e multiplicando pela velocidade angular do rotor, ω , a potência de eixo da turbina pode ser calculada de acordo com a Equação 55.

$$P_{eixo} = B\omega \sum_1^{N-1} \left[\frac{1}{3} A_i (r_{i+1}^3 - r_i^3) + \frac{1}{2} B_i (r_{i+1}^2 - r_i^2) \right] \quad (55)$$

4. RESULTADOS

As Figuras 9 a 11 comparam os coeficientes C_{Torque} e C_{Thrust} cálculos pelo BEM sem a correção para efeitos rotacionais 3D, sendo os coeficientes tangencial e normal ao plano do rotor, respectivamente. A definição e o cálculo dos coeficientes foram feitos de acordo com a convenção apresentada no relatório *Phase VI*. Essa convenção se encontra na Figura 8.

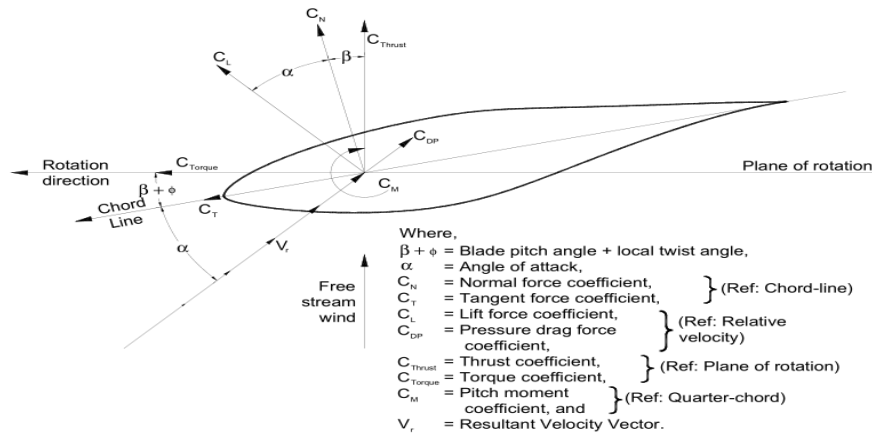


FIGURA 8. Convenção dos coeficientes aerodinâmicos (Fonte: Hand *et. al*, 2001)

De acordo com a convenção apresentada na Figura 8, os coeficientes foram comparados. Os gráficos foram plotados na forma adimensional r/R , em que r representa a posição radial da seção e R o raio total das pás.

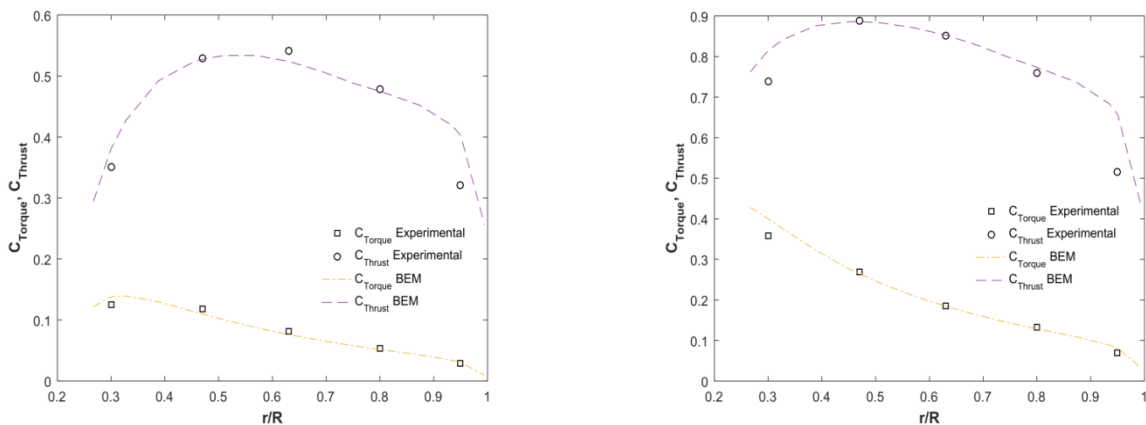


FIGURA 9. Esquerda $V = 5$ m/s e direita $V = 7$ m/s

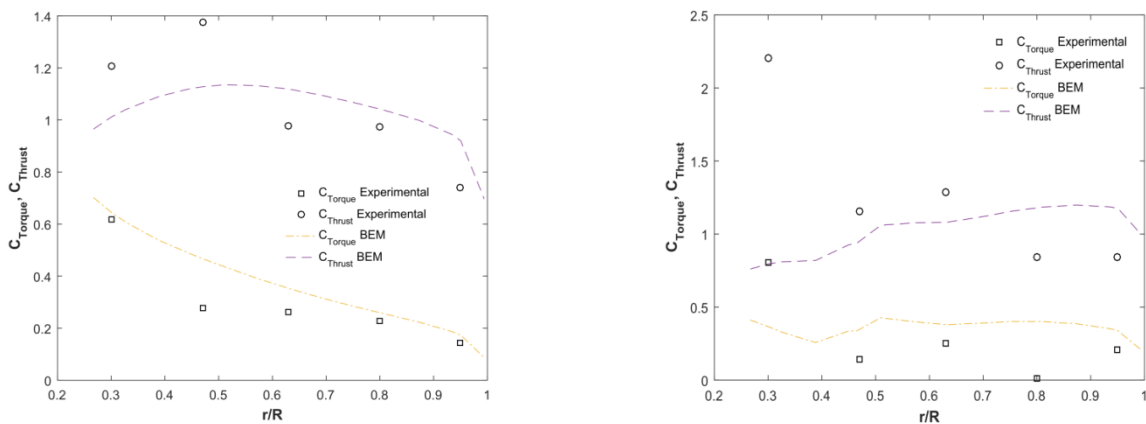
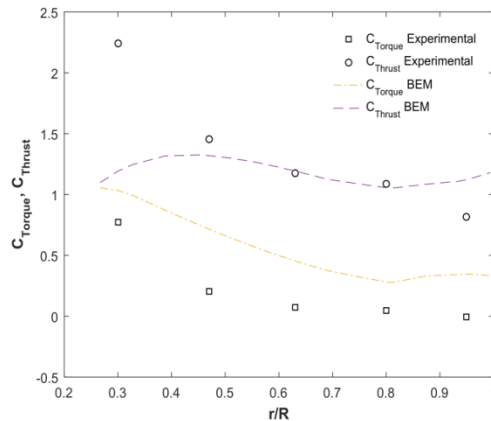


FIGURA 10. Esquerda $V = 10$ m/s e direita $V = 15$ m/s



(e)

FIGURA 11. $V = 25$ m/s

A Figura 12 mostra um gráfico comparativo entre a potência de eixo encontrada usando o BEM com dados dos coeficientes aerodinâmicos obtidos pelo *XFOIL* e em Somers (1997) e a experimental. Numa primeira etapa foi calculada a potência considerando a correção para os efeitos rotacionais 3D e posteriormente não considerando essa correção.

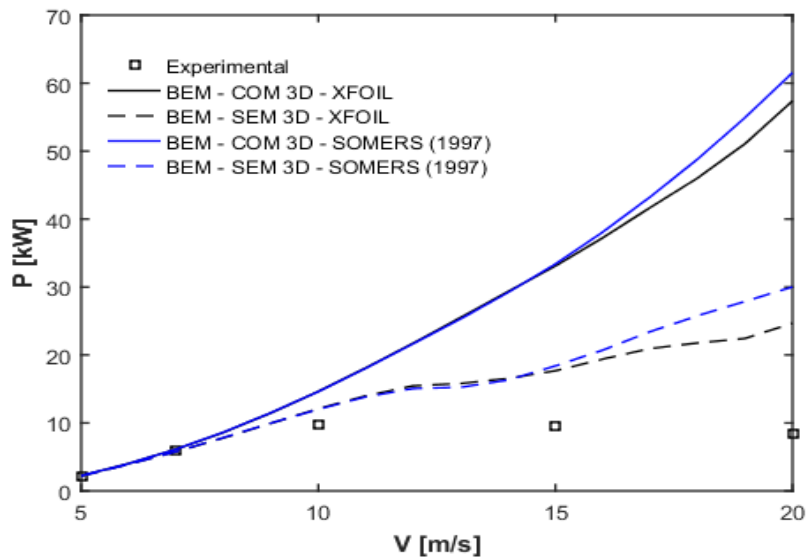


FIGURA 12. Potência de eixo experimental e calculada pelo BEM

5. DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes C_{Torque} e C_{Thrust} não foram calculados usando a correção de efeitos rotacionais 3D devido aos valores superestimados da potência, como pode ser visto na Figura 12. Para as velocidades da Figura 9, observa-se concordância entre os dados experimentais com os resultados calculados pelo BEM. Na Figura 10, o comportamento dos dados experimentais

aparentam apresentarem erros na medição, ficando claro que não há uma tendência nos gráficos como acontece nos gráficos da Figura 9. Outro ponto que merece atenção é um valor nulo de C_{Torque} , fisicamente impossível. Valores próximos de zero também podem ser vistos na Figura 11, porém os dados apresentam certa tendência. Foi reportado em Hand *et. al* (2001) que alguns testes foram prejudicados devido a um entupimento das tomadas de pressão, acredita-se que esses dados que apresentam uma falta de tendência e valores próximos de nulo sejam devido a esse entupimento.

Pela Figura 12, o BEM se mostrou preciso em prever a potência para a velocidade de 5 a 10 m/s. Os bons resultados para as velocidades de 5 e 7 m/s se devem pelo fato dos ângulos efetivos nas seções ao longo da pá estarem na região linear do gráfico C_L em função de α , apresentando resultados em concordância com os valores medidos por Somers (1997), como mostra a Figura 13. Pode-se observar também que após o primeiro estol, que acontece aproximadamente após 10° , os dados simulados estão superestimados. Acredita-se que a diferença entre os resultados para a velocidade de 10 m/s aconteceu devido aos dados superestimados do XFOIL após o primeiro estol. Pode-se notar pela Figura 12 que mesmo usando a base de dados experimental houve uma diferença entre o valor calculado e experimental. Isso se deve ao fato de que para velocidade de 10 m/s o número de Reynolds nas seções ao longo da pá não ultrapassa valores do número de Reynolds de 10^6 , sendo essa potência calculada apenas com os dados simulados. Para as velocidades de 15 e 20 m/s houve uma grande diferença entre os valores calculados e os dados experimentais. Essa diferença se deve pelos altos valores de ângulo de efetivo nas pás, acima de 30° , e do número de Reynolds que acontecem nas seções, acima de 10^6 .

Mesmo após utilizar os dados experimentais houve essa diferença. Isso ocorreu devido aos baixos valores de ângulo de ataque experimentais disponíveis em Somers (1997) e número de Reynolds medidos para valores acima de 10^6 , fazendo com que a base de dados consultada pelo BEM fosse dos dados simulados. Para velocidades mais altas, os dados experimentais e a extrapolação dos dados não se mostraram eficientes.

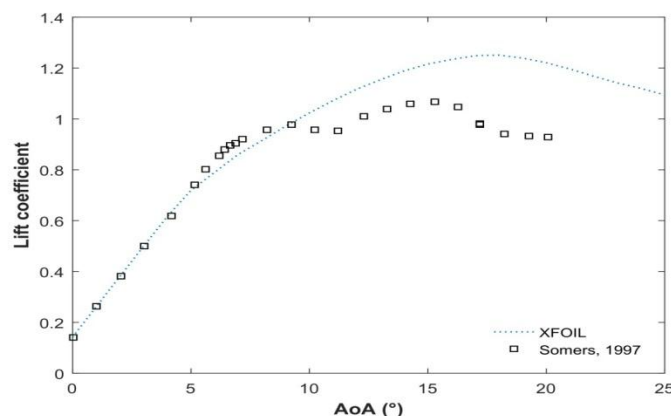


FIGURA 13. Coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque

onde AoA denota o ângulo de ataque.

6. CONCLUSÃO

O método BEM se mostrou eficaz quando se é necessário prever a potência de eixo por uma turbina eólica, podendo auxiliar na criação de futuros parques eólicos. É relevante frisar, que a correta obtenção dos dados em duas dimensões do aerofólio, é extremamente importante para que o método consiga simular corretamente os dados de potência.

Melhores resultados da potência gerada pelas turbinas poderiam ser obtidos caso outras correções fossem implementadas como, por exemplo, a perda de potência causada pelo cubo. Para que se possam atingir valores corretos de produção de potência da turbina com o aerofólio S809 para velocidades do vento maiores que 10 m/s, é sugerida a criação de outro método para determinação dos coeficientes aerodinâmicos, a utilização de outro software, a alteração do código do *XFOIL*, que é um *software* de código aberto para modificações ou testes experimentais com uma maior gama de ângulos de ataque e números de Reynolds, para que haja a convergência de ângulos de ataque maiores.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Engenheiro da National Renewable Energy Laboratory (NREL), Dr. Scott Schreck por disponibilizar os dados experimentais.

8. REFERÊNCIAS

Chaviaropoulos PK, Hansen M. O. L. Investigating three-dimensional and rotational effects on wind turbine blades by means of a quasi-3D Navier–Stokes solver. *J Fluids Eng* 2000;122:330–6.

DUQUE, Earl PN et al. Navier-Stokes and comprehensive analysis performance predictions of the NREL phase VI experiment. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING*, v. 125, n. 4, p. 457-467, 2003.

HAND, M. M. et al. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns. National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US), 2001.

HANSEN, Martin O. L.. Aerodynamics of wind turbines, 2015.

HANSEN, Martin O. L.. Aerodynamics of wind turbines, 2008.

GLAUERT, H. Airplane propellers. In: *Aerodynamic theory*. Springer Berlin Heidelberg, 1935. p. 169-360.

GODREAU, C.; CALDEIRA, J.; DE CAMPOS, J. A. C. F.. Application of blade element momentum theory to the analysis of a horizontal axis wind turbine. In: V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia (MEFTE), 2014.

SOMERS, D.M. Design and Experimental Results for the S809 Airfoil. NREL/SR-440-6918. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1997.

SPERA, David A. Wind turbine technology. 1994.

YELMULE, Mukesh Marutrao; VSJ, Eswararao Anjuri. CFD predictions of NREL phase VI rotor experiments in NASA/AMES wind tunnel. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), v. 3, n. 2, p. 261-269, 2013.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

PREDICTION OF SHAFT POWER OF A TWO BLADE WIND TURBINE

Diego Magela Lemos ⁽¹⁾ (diego.magela1@gmail.com), Caio César Silva Araujo ⁽²⁾ (caioufsj@hotmail.com), Pedro Augusto Lara El-Corab ⁽³⁾ (pedrocorab@gmail.com), Daniel Souza Sampaio (daniel.sampaio@ufsj.edu.br) ⁽⁴⁾, Cláudio de Castro Pellegrini ⁽⁵⁾ (pelle@ufsj.edu.br)

^{(1), (2), (3)} Universidade Federal de São João del-Rei (**UFSJ**) - Discente do Curso de Engenharia Mecânica

^{(4), (5)} Universidade Federal de São João del-Rei (**UFSJ**) – Departamento de Ciências Térmicas e Fluidos - Praça Frei Orlando, 170 - São João del-Rei

ABSTRACT: *Ways to obtain clean and renewable energy have been increasingly researched and studied. The field of wind energy is very promising. The present work evaluates a methodology for predicting the shaft power generated by a turbine based on the Blade Element Momentum method. Two-dimensional aerodynamic coefficients given by simulations with the XFOIL software, as well as experimental data were used to feed the BEM algorithm. Corrections were used for Prandtl's Tip Loss caused by vortex generation by blade tip, Spera correction to correct axial induction and correction for 3D rotational effects due to separation of the flow and influences of Coriolis forces and centrifugal. The predictions were compared with results obtained experimentally for a turbine with two blades. It is concluded that the method is effective when it is necessary to predict the shaft power of a wind turbine, provided that the aerodynamic coefficients are used correctly.*

KEYWORDS: *Wind energy, Blade Element Momentum, Wind turbine, Shaft power.*