

LEVANTAMENTO DA CURVA DE DESEMPENHO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE PROJETADOS COM PERFIS NACA DE QUATRO DÍGITOS, ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NÚMERICA UTILIZANDO A BIBLIOTECA DE CFD OPENFOAM

Carneiro, Francisco Olimpio Moura, olimpiomcarneiro@gmail.com

Rocha, Paulo Alexandre Costa, paulo@posmec.ufc.br

Silva, Maria Eugenia Vieira da, eugenia@posmec.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, S/N. Bloco 714. Fortaleza-CE.

Resumo: Este trabalho consistiu na utilização da biblioteca de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, em inglês) de código aberto, OpenFOAM, para a solução em regime permanente do escoamento tridimensional sobre aerogeradores de pequeno porte, utilizando os modelos de turbulência RANS $k-\epsilon$ e $k-\omega$ SST. Objetivando realizar o levantamento teórico da curva de eficiência, calcularam-se valores para o coeficiente potência em diferentes velocidades específicas. O rotor possui 1,5m de diâmetro e é composto de três pás projetadas pelo método do Momento do Elemento de Pá (BEM, em inglês) para velocidade específica igual a cinco, utilizando perfis NACA de quatro dígitos (4412 e 6412). As simulações foram realizadas supondo uma velocidade de corrente livre igual a 7,5m/s. Para cada uma das situações mencionadas foi realizado um conjunto de 6 simulações, nas quais variou-se a velocidade de rotação da pá de acordo com a velocidade específica desejada – 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Os momentos de pressão e de viscosidade sobre as pás obtidos em cada uma das simulações foram utilizados para calcular os respectivos coeficientes de potência. Os resultados demonstraram que os modelos utilizados fornecem maiores coeficientes de potência para perfis com pouca cambagem, como o NACA4412, sendo os resultados compatíveis com dados de literatura.

Palavras-chave: coeficiente de potência, aerogerador de pequeno porte, teoria do momento do elemento de pá, OpenFOAM

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias capazes de extrair energia de fontes renováveis ganharam atenção especial na tentativa de reduzir os danos ambientais, os quais têm sido causados pelo aumento da taxa com a qual as indústrias retiram matérias primas da natureza, gerando, por consequência, impactos profundos e duradouros. Esta extração intensa imposta pelo homem na natureza é consequência direta da necessidade de crescimento contínuo, seja ele pelo aumento quantidade populacional e/ou pela melhora nas condições da qualidade de vida. No entanto as motivações que têm levado o homem a buscar novas matrizes sofreram mudanças nos últimos tempos, uma vez que as fontes com as quais estão apoiadas as matrizes energéticas são finitas e algumas delas no prazo de vida de um ser humano, como o petróleo. Desta forma, a mudança para matrizes energéticas de fontes renováveis terão caráter limitador à evolução humana.

Analisando as tecnologias renováveis no âmbito da economia é certo que elas não são auto sustentáveis, devido basicamente à eficiência de conversão e à sazonalidade das fontes. Logo a utilização destas tecnologias se tornou possível devido não só aos avanços tecnológicos, mas também pelas mudanças nas políticas financeiras dos países as quais as utilizam. A injeção direta e/ou indireta, como através de subsídios, de verba para desenvolvimento e implantação destas tecnologias tornaram-nas atrativas a diversos ramos industriais.

A seleção do tipo de energia renovável que será mais bem aproveitada está intimamente ligada à região do globo no qual a tecnologia será instalada. No entanto a energia eólica tem sido largamente utilizada devido ao fato desta ser uma tecnologia já economicamente acessível.

A energia eólica enquanto foco de estudos científicos ganhou uma ferramenta poderosa nos últimos anos – o CFD – a sigla para *Computational Fluid Dynamics*. Apesar dos modelos de turbulência e dos algoritmos para solução de escoamento terem sido desenvolvidos, em sua maioria, até a década de 70, estes só puderam ser utilizados em geometrias complexas na última década, devido à rápida ascensão da capacidade de processamento dos computadores.

A viabilidade da utilização da ferramenta CFD contribui de forma proeminente no estudo de aerogeradores, uma vez que tanto a geometria como os efeitos aerodinâmicos são complexos. Este último requerer uma carga computacional severa, já que os efeitos no escoamento são tridimensionais e acontecem em diferentes escalas de comprimentos característicos.

No Brasil existem motivações ainda maiores que justificam os estudos e aplicações de sistemas de energia eólica, uma vez que de acordo com a ANEEL (2002), o potencial eólico brasileiro é da ordem de 143GW.

Este trabalho se propõe a analisar os efeitos aerodinâmicos de pressão e viscosidade em escoamentos sobre aerogeradores. Utilizou-se para tanto modelos de turbulências RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes – de duas equações a fim de compor a curva de eficiência de aerogeradores em tempo economicamente viável.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelos de turbulência RANS

Os modelos de turbulência RANS são os mais leves, em termos computacionais, dos modelos de turbulência, tendo vasta aplicação nas últimas três décadas em problemas diversos de engenharia, devido ao seu custo-benefício.

A atenção dos esforços computacionais é voltada para as médias das propriedades do escoamento e como a flutuação impacta sobre elas.

Logo para tratar estas flutuações algumas equações, além das equações de Navier-Stokes, são adicionadas como consequência da análise estatística sobre a decomposição de Reynolds.

Os modelos RANS se utilizam da aproximação de Boussinesq para prever o Tensor de Reynolds. Tal aproximação se originou em 1877 quando Joseph Valentin Boussinesq postulou que a transferência de momento causada pelos turbilhões gerados pelo escoamento turbulento pode ser modelada considerando-se uma viscosidade turbulenta, μ_t .

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (1)$$

A viscosidade inerente ao fluido e os efeitos de turbulência causam, independentemente, o mesmo efeito sobre o escoamento, que é a dificuldade de escoar em determinada direção. No entanto são de naturezas completamente diferentes. Enquanto a primeira é uma propriedade física e impacta diretamente sobre a tensão entre as camadas de moléculas do fluido, a segunda é marcada por um comportamento caótico do movimento nas três direções. Este comportamento desordenado gera turbilhões os quais consomem quantidade de movimento a qual seria gasta para motivar o escoamento em determinada direção preferencial. Mas modelar matematicamente os efeitos da turbulência sobre um escoamento ainda é um desafio para a ciência. Neste contexto a aproximação feita por Boussinesq assemelhou o efeito da movimentação caótica a um aumento da viscosidade sendo este a base dos modelos de turbulência RANS.

2.2 Indicadores de desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas

O objetivo das pás de um gerador eólico é extrair o máximo de energia do fluxo de ar que passa pela secção do rotor. No entanto este fluxo não é constante durante o período de operação do sistema. Logo conhecer o comportamento dessa extração enquanto o fluxo e/ou a rotação varia é primordial para conhecer a viabilidade de operação da turbina.

O primeiro passo é conhecer o quanto de energia que passa em um dado intervalo de tempo pela secção do rotor, chamada de Fluxo de Energia Cinética, FEC, que é dado por:

$$FEC = \frac{1}{2} \rho U^3 \pi R^2 \quad (2)$$

Onde,

ρ = Densidade do ar;

U = Velocidade de corrente livre;

R = Raio do rotor.

Uma vez conhecida a potência disponível que passa pelo disco do rotor chama-se a razão entre ela e a potência extraída, P , de Coeficiente de Potência, C_p . Este coeficiente possui um valor limite conhecido como Limite de Betz, igual a 0,593.

$$C_p = \frac{P}{FEC} \quad (3)$$

A velocidade específica, λ , relaciona a velocidade de corrente livre com a velocidade linear na extremidade da pá. Desta forma, relacionar a eficiência de extração, C_p , com a variação, combinada, de velocidade de corrente livre e rotação da turbina fornece de forma objetiva o comportamento do gerador para diferentes velocidades do ar. Assim a forma mais eficaz de descrever através de gráfico a eficiência de um aerogerador é através da curva $C_p - \lambda$, conforme é apresentado na Figura 01.

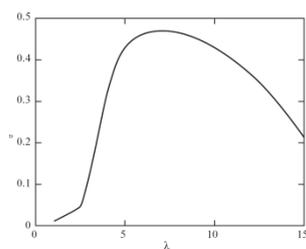


Figura 01 - Gráfico de desempenho típico de uma turbina tripá moderna (FONTE: Burton *et al.*, 2001).

3. METODOLOGIA

3.1 Projeto da pá

As pás foram confeccionadas utilizando a teoria do BEM – *Blade Element Moment* – (Alvarez *et al*, 2008) utilizando perfis NACA da série de quarto dígitos, 4412 e 6412. Estas foram projetadas para velocidade específica igual a 5, com correção na curva de afilamento, objetivando facilitar o processo de construção, e sem correção de efeito de ponta.

3.2 Parametrização da malha

O processo de parametrização objetiva fornecer o melhor resultado com o menor nível de refinamento possível. Logo neste estágio são realizados refinamentos sucessivos e observado o resultado da simulação até não haver mudanças significativas. Isto é chamado de independência de malha.

O nível de refinamento impacta na solução até abranger a menor escala de acontecimentos significativos ao escoamento analisado. Deste estágio em diante o aumento na discretização do volume de controle aumentará o número de equações que serão resolvidas sem melhorar o resultado, mas tendo como consequência um crescimento elevado no tempo de solução.

No caso específico do escoamento sobre aerogeradores, além do refinamento, a distância entre a turbina e os contornos de entrada e saída de fluido no volume de controle deve ser analisada, uma vez que tais condições se propagam até a região de análise do rotor, os resultados de pressão e velocidade para cálculos de força e momento sobre a pá serão modificados fornecendo resultados errôneos (Carneiro *et al*, 2009).

Desta forma, a sequência de parametrização adotada foi a seguinte:

1. Distância a jusante do aerogerador;
2. Distância a montante do aerogerador;
3. Refinamento na zona que abrange o cone de expansão.

3.3 Ajuste das condições de contorno

Os modelos de turbulência utilizados foram o k-ε e o k-ω. Logo os parâmetros de energia cinética turbulenta, k, e sua dissipação, ε e ω, necessitam ser ajustados.

3.3.1 Ajuste de k

A Energia cinética turbulenta é calculada tomando como base uma estimativa da flutuação da velocidade em relação ao escoamento principal, da seguinte forma:

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (4)$$

Onde,

u' = Flutuação no eixo x tomado por um percentual da corrente livre.

v' = Flutuação no eixo y tomado por um percentual da corrente livre.

w' = Flutuação no eixo z tomado por um percentual da corrente livre.

Os casos foram todos ajustados tomando um percentual de flutuação nos três eixos (turbulência isotrópica) como sendo 10% do valor da corrente livre.

3.3.2 Ajuste de ε e ω

O ajuste do valor de dissipação de energia cinética turbulenta nos dois modelos, k-ε e k-ω, são calculados em função da energia cinética turbulenta, k. No entanto existe uma dependência ε para o cálculo de ω (Wilcox, 1994).

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (6)$$

Onde,

l = Comprimento característico.

3.4 Comprimento característico

O comprimento característico assumido para o cálculo dos valores de dissipação de energia cinética turbulenta foi o menor valor obtido da geometria da pá. No caso, a menor corda, localizada na extremidade da pá dentre as três analisadas, 0,097m. Tal escolha objetivou captar os menores efeitos de vorticidade gerados pela forma. Esses vórtices irão se dissipando em menores, como previsto por Kolmogorov, no entanto os efeitos dessas estruturas menores terão sua importância definida na parametrização da malha, ao passo que se refina esta até os resultados não se modificarem, bem como pelo algoritmo de solução.

3.5 Condições de contorno

Para a realização das simulações, utilizou-se a biblioteca de CFD OpenFOAM (Weller et al., 1998). Logo se fez necessário configurar os arquivos de condições de contorno de pressão, velocidade, energia cinética turbulenta e dissipação de energia cinética turbulenta, U , p , k , ε e ω , respectivamente. Em todos estes arquivos são inseridas as condições de contorno de cada uma das fronteiras.

Como este trabalho objetivou realizar o levantamento da curva de eficiência do rotor, foi necessário variar as condições de contorno de velocidade angular da região das pás, a fim de obter diferentes velocidades específicas. Todas as condições aplicadas no volume de controle são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de contorno aplicadas

Região	Condições				
	Velocidade (linear/angular)	Pressão	k	ω	ε
Entrada	7,5 m/s	Gradiente zero	0,844 m ² /s ²	31,265/s	26,380m ² /s ³
Saída	Gradiente zero	0 Pa	Gradiente zero	Gradiente zero	Gradiente zero
Contorno	Gradiente zero	Gradiente zero	Gradiente zero	Gradiente zero	Gradiente zero
Rotor	10,0 à 35,0 rad/s	Gradiente zero	Gradiente zero	Gradiente zero	Gradiente zero

As curvas de eficiência foram levantadas tomando-se oito pontos de velocidade específica, λ . Estes assumiram os valores 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Uma vez que a velocidade de corrente livre foi admitida como 7,5m/s, as velocidades de rotação em rad/s foram, 10,0, 15,0, 20,0, 25,0, 30,0 e 35,0rad/s.

3.6 Parâmetros numéricos

Os parâmetros numéricos utilizados na obtenção da solução são ajustados objetivando alcançar a maior estabilidade com o menor tempo de solução possível. Tais valores são selecionados após análise dos resultados de sucessivas simulações do problema envolvido. Estes parâmetros são os fatores de relaxação e o esquema de discretização. Os primeiros impactam fortemente sobre a estabilidade e o tempo de convergência, mas diferentemente do segundo não impactam sobre os resultados convergidos. O esquema de discretização é selecionado visando adequar o modelo às suas características físicas convectivas ou difusivas. A seguir, na Tabela 2, encontram-se os valores utilizados neste trabalho.

Tabela 2 – Parâmetros numéricos aplicados

Variável	Fatores de relaxação	Esquema de discretização
p	0,01	Upwind
k	0,1	Upwind
ε	0,1	Upwind
ω	0,1	Upwind
v	0,1	Gamma

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados tanto levaram em consideração a contribuição do momento gerado pelo arrasto viscoso sobre o aerogerador, como também o desconsideraram. Esta opção pode ser justificada por causa da geral super

estimativa do arrasto em modelos RANS, uma vez que estes consideram que toda a extensão do perfil está sob regime turbulento, desconsiderando as zonas laminar e de transição, que possuem menor arrasto. Assim foram plotados resultados considerando apenas o momento gerado pelo efeito de pressão sobre a pá, ou seja, torque total subtraindo-se o arrasto viscoso, bem como o momento total gerado na pá (torque de pressão somado ao viscoso). Os resultados obtidos para as pás projetados com os perfis NACA 4412 e 6412 estão apresentados nos Gráficos 1, 2, 3 e 4.

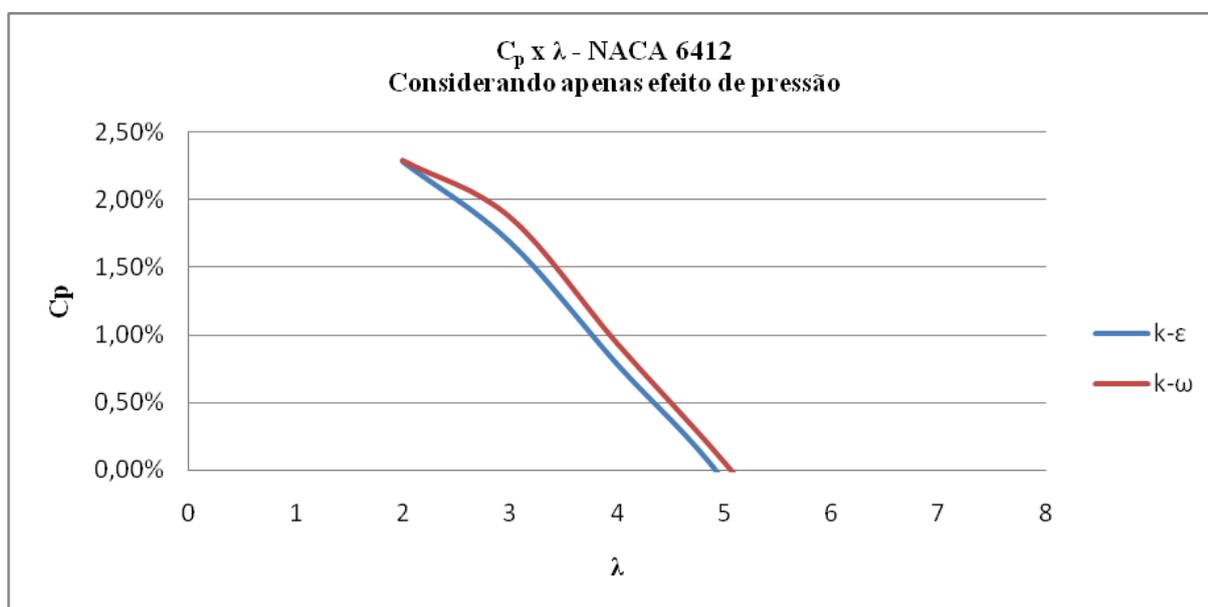


Gráfico 1 – Curva de desempenho da pá equipada com o perfil NACA6412 analisada nos modelos k-ε e k-ω, considerando apenas os momentos de pressão.

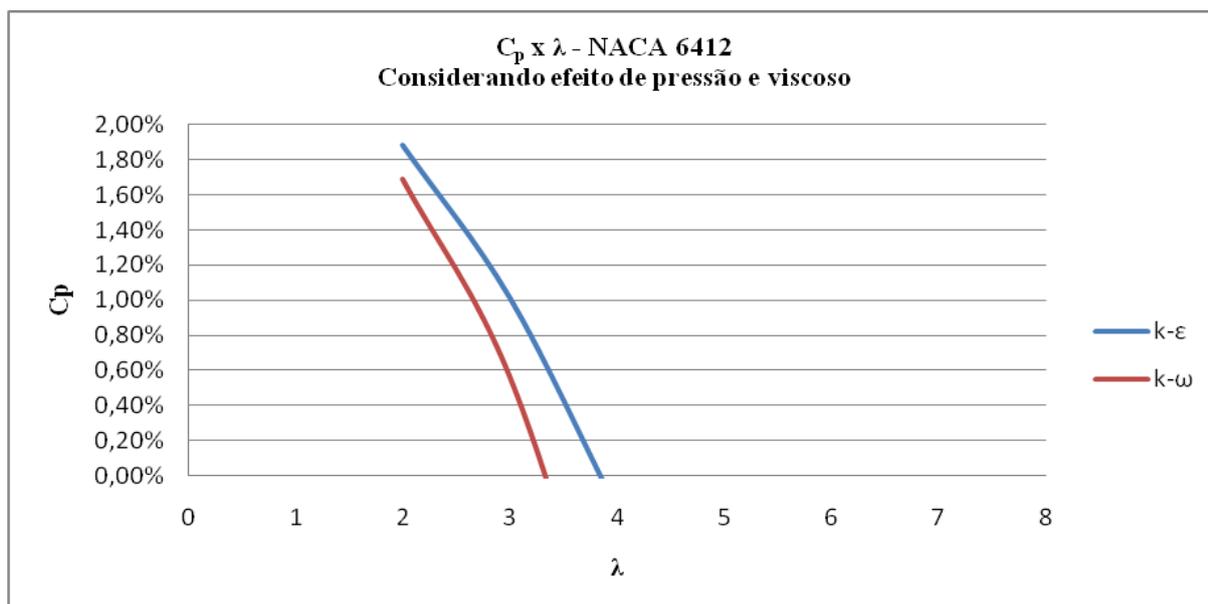


Gráfico 2 – Curva de desempenho da pá equipada com o perfil NACA6412 analisada nos modelos k-ε e k-ω, considerando o resultante entre momento de pressão e momento viscoso.

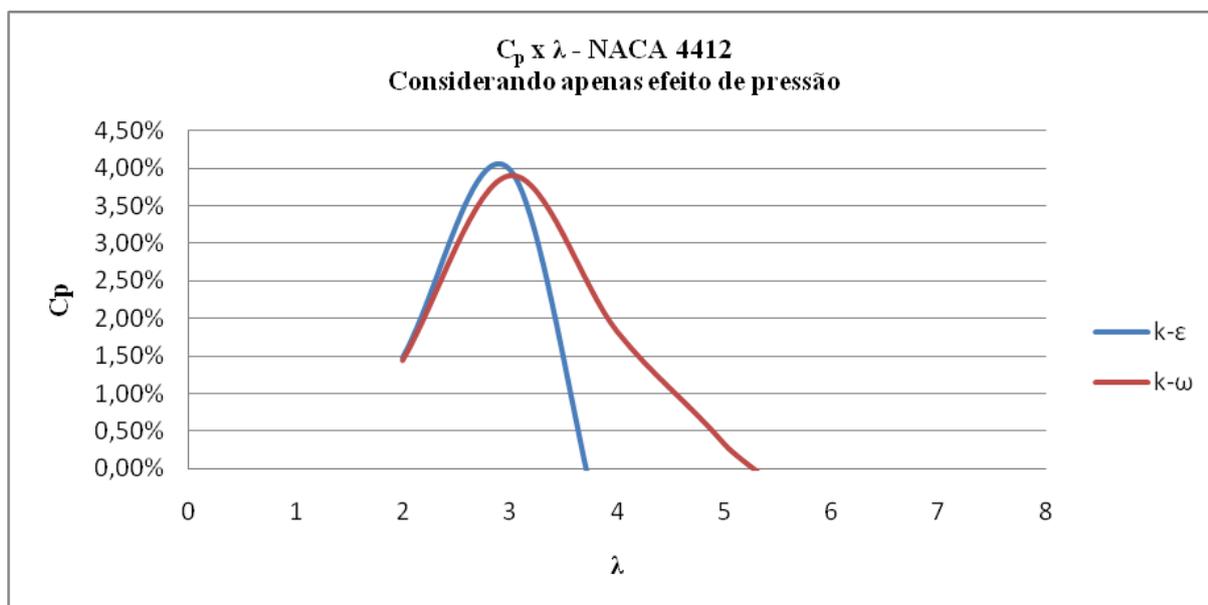


Gráfico 3 – Curva de desempenho da pá equipada com o perfil NACA4412 analisada nos modelos k- ϵ e k- ω , considerando apenas os momentos de pressão.

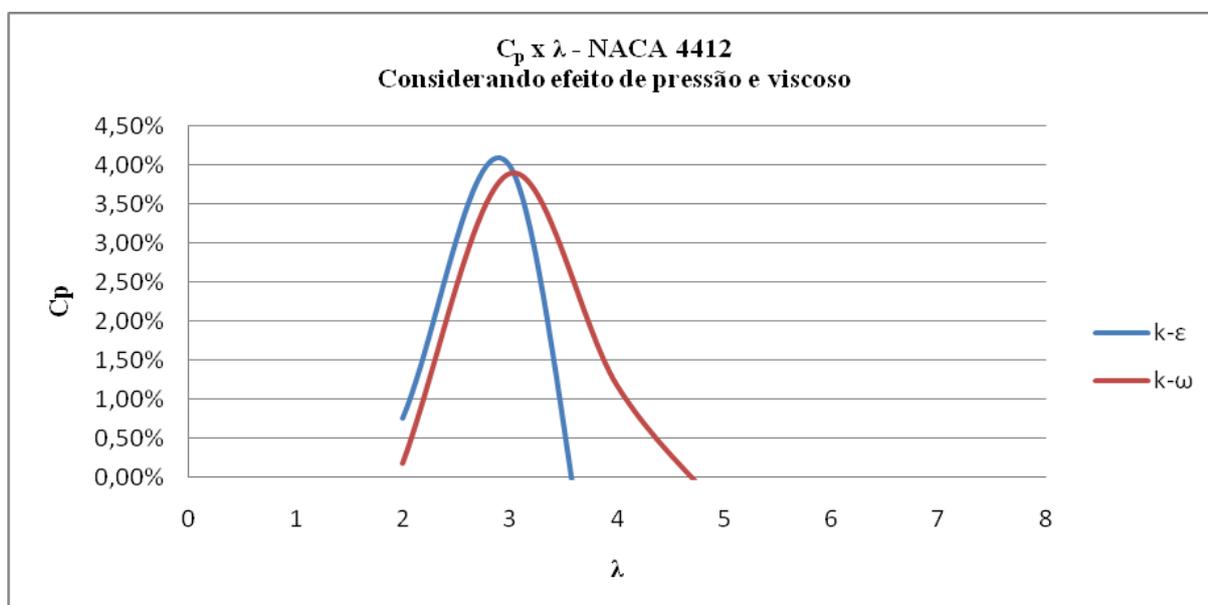


Gráfico 4 – Curva de desempenho da pá equipada com o perfil NACA4412 analisada nos modelos k- ϵ e k- ω , considerandoa resultante entre momento de pressão e momento viscoso.

Os altos números de Reynolds, principalmente para valores mais elevados de λ , os efeitos de rotação e a complexidade da geometria fazem com que o escoamento sobre o aerogerador seja caracterizado pela turbulência. Como a modelagem da turbulência possui uma dependência da suposição das flutuações, na equação da energia cinética turbulenta, e da definição de um comprimento característico, os resultados apresentados demonstram a deficiência dos modelos de turbulência em calcular as forças viscosas.

A curva de desempenho do rotor equipada com o NACA 4412, para os dois modelos de turbulência analisados, foi compatível com os dados de literatura. Como este perfil é menos curvado, em relação ao NACA 6412, o gradiente de pressão é menor entre o intradorso e o extradorso, tendo como consequência um retardo do descolamento de camada limite para o mesmo número de Reynolds. Assim o nível de turbulência nas mesmas condições de uso é menor, desta forma amenizando a incapacidade dos modelos RANS em resolver problemas nos quais os níveis de turbulência são elevados.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram levantadas as curvas de eficiência (coeficiente de potência versus velocidade específica) para dois aerogeradores de 3m de diâmetro. As pás foram projetadas (afilamento e ângulo de torção) aplicando a teoria

do Momento do Elemento de Pá, utilizando os perfis NACA 4412 e 6412. A velocidade específica de projeto foi igual a cinco.

As malhas geradas para cada aerogerador foram parametrizadas utilizando critérios de trabalhos anteriores (Carneiro et al, 2009). Os parâmetros aplicados garantiram a independência da solução numérica à malha.

Para a solução numérica do escoamento foi utilizada a biblioteca de CFD de código aberto OpenFOAM. Os modelos de turbulência de duas equações $k-\epsilon$ e $k-\omega$ SST foram aplicados.

Os resultados mostraram que o gerador projetado com o perfil NACA 4412 atingiu uma maior eficiência para ambos os modelos de turbulência testados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2003, “Atlas de Energia Elétrica no Brasil 2002”, acesso em 15 de janeiro de 2015, disponível em <http://www.aneel.gov.br>.

Alvarez, A. C. C., Rocha, P. A. C. and Carneiro, F. O. M., *Aerodynamic project of a three bladed wind turbine for low intensity wind, using the blade element momentum theory*, Annals of the V National Congress of Mechanical Engineering, Salvador, Brazil.

Burton, T., Shape, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., *Wind energy handbook*, John Wiley & Sons Ltd., 2001.

Carneiro, F. O. M., Rocha, P. A. C., Modolo, A. B., Silva, M. E. V., *Parameterization of a hexaedric mesh generation process for the application in the flow solution over a small scale wind turbine*, Annals of the 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brazil.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, Prentice Hall, Second Edition, 2007.

Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C., 1998. "A tensorial approach to continuum mechanics using object-oriented techniques". Computers in Physics 12 (6), 620 - 631.

Wilcox, D. C., *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc., La Canada, CA, 1994.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ESTIMATIONS OF THE PERFORMANCE CURVE FOR SMALL WIND TURBINES DESIGNED WITH FOUR DIGITS NACA PROFILES, THROUGH NUMERICAL SIMULATION USING THE CFD LIBRARY OPENFOAM

Carneiro, Francisco Olimpio Moura, olimpiomcarneiro@gmail.com

Rocha, Paulo Alexandre Costa, paulo@posmec.ufc.br

Silva, Maria Eugenia Vieira da, eugenia@posmec.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, S/N. Bloco 714. Fortaleza-CE.

Resumo: This work consisted in using the open source library of Computational Fluid Dynamics (CFD) OpenFOAM, to obtain the solution for a steady three-dimensional flow on small wind turbines, applying the RANS turbulence models $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ SST. Aiming to estimate the theoretical efficiency curve, values were calculated for the power coefficient at different tip speed ratios. The rotor has a diameter of 1.5 m and consists of three blades designed by the Blade Element Momentum (BEM) method for the tip speed ratio equal to five and using NACA four-digit profiles (4412 and 6412). The simulations were performed assuming a free-flow speed equal to 7.5 m/s. For each of the situations described was carried out a set of 6 simulations, in which the blade speed of rotation was varied according to the desired tip speed ratio - 2, 3, 4, 5, 6 and 7. The pressure and viscosity momentum on the blades obtained in each of the simulations were used to calculate the power coefficients. The results showed that the models used provide higher power coefficients for profiles with small camber, as NACA 4412 and it is compatible with the literature data.

Keyword: *power coefficient, small wind turbine, Blade Element Momentum, OpenFOAM*