

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

OTIMIZAÇÃO AERODINÂMICA DE ROTORES EÓLICOS

Fábio Matos Kayser, fabio_mk_66@hotmail.com¹

Hélio de Assis Pegado, helioeng@hotmail.com²

Leonel Leonardo Delgado Morales, leonel.morales@udf.edu.br³

^{1,2,3}UDF-Centro Universitário do Distrito Federal, Setor de Edifícios Públicos Sul, Eq 704/904, Conj. A – Asa Sul, Brasília – DF – CEP: 70390-045

Resumo: Os estudos na área de energia eólica mostram-se relevantes atualmente, tendo em vista a crescente demanda de fontes de energias renováveis. Neste viés, este trabalho almeja elevar a captação de energia através das pás de um rotor eólico. Para tanto, foi realizado um estudo relacionado com os perfis aerodinâmicos, e suas propriedades relevantes para a geração de energia eólica. Um método numérico foi utilizado para otimizar o perfil das pás do rotor. Tal otimização foi iniciada para elaborar uma função objetivo que rege o coeficiente de sustentação (C_l) do perfil com seu ângulo de ataque (α). O processo computacional para a busca de valores ótimos foi realizado por meio do software MATLAB. Para mostrar que houve um possível aumento de performance do rotor, o seu torque foi calculado considerando um perfil de configuração convencional, e com o que apresenta a característica ótima. Em seguida, os torques foram comparados para corroborar a metodologia apresentada nesta pesquisa.

Palavras-chave: Rotor, Otimização, Energia Eólica, Perfil Aerodinâmico.

1. INTRODUÇÃO

Em virtude de possíveis crises energéticas e da preocupação com o meio ambiente, as atenções estão voltadas para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como por exemplo, a energia eólica. Com isso, a implementação de turbinas eólicas torna-se uma alternativa promissora. Essas turbinas convertem a energia cinética disponível nos ventos em energia elétrica, que será entregue por meio de redes de distribuição. Mediante a esses fatos, surgiram iniciativas por parte do governo federal brasileiro, subsídio financeiro e programas de financiamento, conhecido como PROEÓLICA (Resolução nº 24, da Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica – CGE). Esta ação levou ao aumento do número de usinas eólicas instaladas no país (Sanson, 2006).

As turbinas eólicas são máquinas que extraem uma parcela da energia cinética contida nas correntes de vento, convertendo-a em energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica por intermédio de um gerador elétrico conectado. Desde a década de 80, quando as primeiras turbinas eólicas comerciais foram desenvolvidas, algumas de suas características como design, eficiência e capacidade instalada, tiveram uma melhora significativa. De fato, a progresso visto nas turbinas eólicas modernas é notável dentro da engenharia (Pinto, 2013).

Corpos de sustentação como os perfis aerodinâmicos são empregados para gerar a máxima força normal e o menor arrasto possível. O ângulo entre a corrente de ar e a corda do perfil é denominado ângulo de ataque (α). As forças de sustentação e de arrasto variam em termos desse ângulo. Na aerodinâmica, a sustentação e o arrasto, muitas vezes são calculados de maneira adimensional, na forma de coeficientes (White, 2011).

As forças resultantes da incidência do vento nos perfis aerodinâmicos das pás do rotor eólico fazem com que a turbina gere energia. A relação entre a força de sustentação e arrasto influencia de forma significativa no desempenho da turbina. A força de sustentação é responsável pela produção de torque no rotor, e conseqüentemente de potência. A sustentação em um rotor eólico pode ser aumentada até certo ponto, acima disso, a força de arrasto irá crescer expressivamente, ocasionando uma queda na performance da turbina. Encontrar um ponto ótimo, onde a razão entre o coeficiente de sustentação e arrasto favoreça o máximo possível a extração de energia, torna-se interessante.

Inicialmente, foram estimadas algumas grandezas relevantes aos rotores, para que posteriormente a otimização do perfil das pás pudesse ser realizada. Tendo como premissas, o conceito do disco atuador e a teoria de momento de elemento de pá, as forças aerodinâmicas no perfil que contribuem no torque do rotor foram determinadas. Desta forma, a metodologia de otimização arrolada neste trabalho pôde ser aplicada.

Os métodos numéricos mostram-se de grande préstimo e relevância na engenharia, assim como em outras ciências. Como explicado por Gilat e Subramaniam (2008), os métodos numéricos são artifícios utilizados na solução de problemas matemáticos de alta complexidade, que seriam difíceis de resolver analiticamente. A otimização supracitada nesta pesquisa, tem como alicerce dois processos numéricos, um ajuste de curvas e a verificação de um valor ótimo. As técnicas numéricas presentes foram subsidiadas por recursos computacionais.

Esta pesquisa tem a finalidade de otimizar as condições de operação do perfil das pás de um rotor eólico, de maneira que a geração de energia pela turbina seja aumentada. Deu-se o início da otimização por meio de um ajuste de curvas, obtendo-se a função objetivo que governa o problema. Uma ferramenta do software MATLAB permitiu determinar o valor ótimo para o ângulo de ataque, onde a sustentação seria máxima para aquelas condições, ambas as grandezas relacionadas pela função objetivo. Conhecido o coeficiente de sustentação do perfil ótimo, foi estimado o coeficiente de arrasto observando a curva polar do perfil. Em seguida, algumas teorias da aerodinâmica foram estudadas, para entender a influência do ângulo de ataque (α) e do coeficiente de sustentação (C_l) no desempenho do rotor. Por fim, foi calculado o torque do rotor considerando o perfil ótimo e também o perfil convencional, verificando um aumento de performance minimamente notável.

2. METODOLOGIA

Primeiramente foi realizado um estudo sobre perfis aerodinâmicos e suas propriedades que favorecem a geração de energia em uma turbina eólica de eixo horizontal. Devido a isso, foi avaliado um perfil apropriado para este tipo de aplicação. Levando em consideração seu coeficiente de sustentação (C_l), quando submetido a um ângulo de ataque, em um escoamento particular.

De acordo com Pinto (2013), em turbinas eólicas normalmente encontra-se perfis NACA da série quatro dígitos. Um exemplo dessa espécie de perfil é o NACA 4412, mostrado na Fig. 1. Este perfil em particular foi o objeto de estudo desta pesquisa.

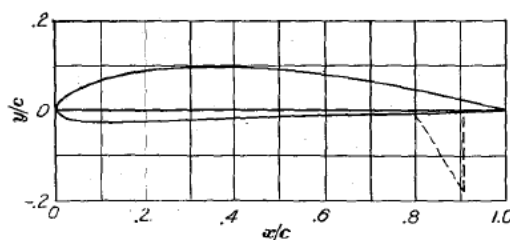


Figura 1: Perfil NACA 4412 (Adaptado de Abbot e Von Doenhoff, 1945)

Na otimização do perfil, houve a necessidade de formular uma função objetivo, que caracterizasse alguns pontos da sua curva de sustentação ilustrada na Fig. 2, assim, a mesma pôde ser otimizada. Para determinar a função objetivo, um ajuste de curva se fez imprescindível. Para tanto, foi usada a regressão polinomial, pelo fato do perfil NACA 4412 não comportar-se de maneira totalmente linear.

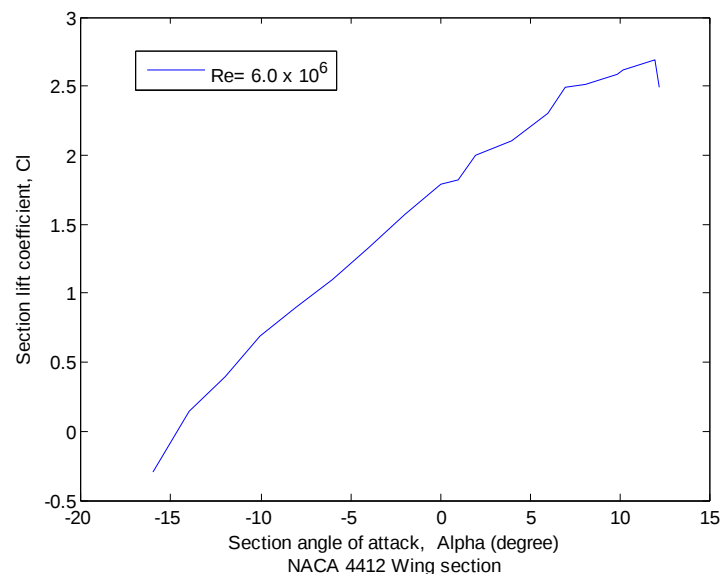


Figura 2: Curva de Sustentação do perfil NACA 4412 (Adaptado de Abbot e Von Doenhoff, 1949)

O ajuste de curvas foi realizado utilizando os pontos da curva de sustentação da Fig. 2, para um escoamento com Número de Reynolds igual a 6.0×10^6 . A função objetivo sendo conhecida, partiu-se para a otimização do perfil. Esta tarefa foi feita com auxílio da ferramenta “fminbnd”, que é residente do MATLAB. Como requerido pelo procedimento computacional, a função objetivo foi inserida. O dado resultante foi o valor do ângulo de ataque, em que o coeficiente de sustentação para este perfil será máximo. Conhecido o coeficiente de sustentação do perfil ótimo, este dado permitiu estimar seu coeficiente de arrasto, a partir de observações gráficas na polar de arrasto, vista na Fig. 3. O coeficiente de arrasto foi encontrado considerando o Número de Reynolds igual a 6.0×10^6 .

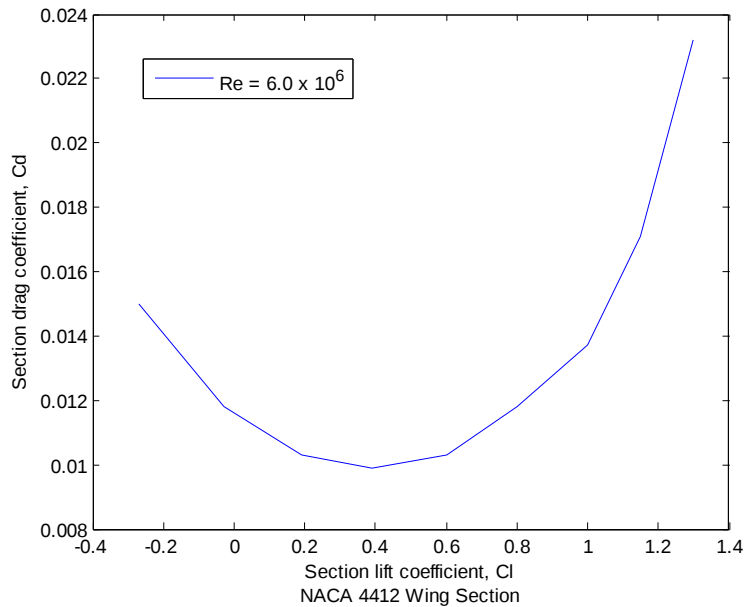


Figura 3: Polar de arrasto do perfil NACA 4412 (Adaptado de Abbot e Von Doenhoff, 1949)

Para calcular o torque da turbina utilizando o perfil otimizado, além dos coeficientes aerodinâmicos obtidos pelos métodos numéricos aqui expostos, houve a necessidade de estimar o coeficiente de potência (C_p) e a razão entre as velocidades na ponta da pá (λ). Estas grandezas foram adquiridas por meio de observações no gráfico da Fig. 4. Conforme Da Silva (2013), para estimar esses parâmetros, gráficos como o da Fig. 4, que relacionam λ à turbinas eólicas de três pás, e ao coeficiente de potência, mas o C_p foi recalculado, de maneira que se possa averiguar a exatidão da estimativa preliminar.

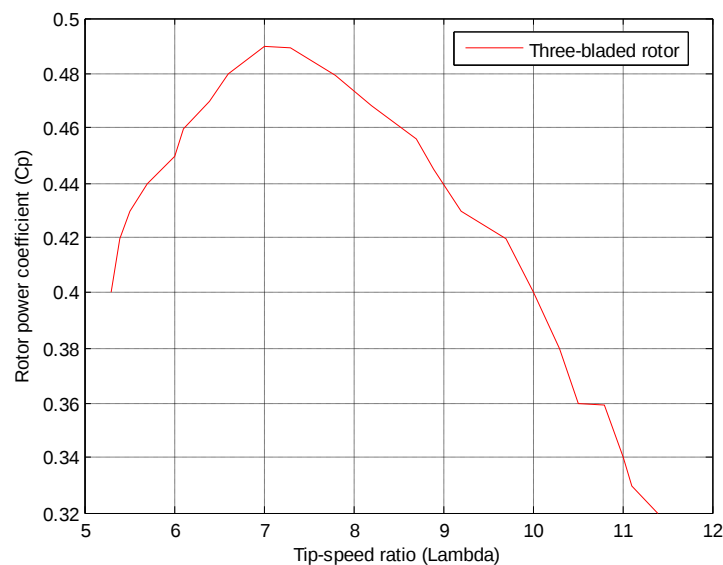


Figura 4: Relação entre λ e C_p para turbinas de três pás (Adaptado de Da Silva, 2013)

Com o valor de C_p determinado a partir de observações no mapa da Fig. 4 e a velocidade da corrente de vento da Tab. 1, a rotação da turbina foi calculada pela Eq. 5. A partir desses dados, as demais variáveis como ângulo de escoamento (ϕ), coeficiente de força normal (C_x), fator de indução normal (a), coeficiente de torque (C_t) e o torque foram encontrados pelas equações que serão apresentadas mais a frente.

O coeficiente de sustentação (C_l) do perfil ótimo foi adquirido na otimização, e o coeficiente de potência (C_p) foi recalculado para que seu valor possa ser comparado com o obtido na estimativa inicial. Para o perfil convencional, os seus coeficientes de sustentação e arrasto foram adotados por meio dos gráficos das figuras 2 e 3. Com exceção dos coeficientes aerodinâmicos, as outras variáveis são as mesmas para ambos os casos. Conhecidos os torques das turbinas, para cada perfil, os resultados foram averiguados.

2.1. Regressão Polinomial

Conforme Gilat e Subramaniam (2008), a regressão polinomial é um método usado para encontrar os coeficientes de um polinômio de segundo grau, ou de ordem superior, de maneira que essa expressão forneça o ajuste mais adequado para um conjunto de valores.

As Eqs. de 1 a 4, expostas por Gilat e Subramaniam (2008), permitem ajustar um conjunto de dados para uma função de grau dois ou maior.

$$na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_3 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_3 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (2)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5\right)a_3 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \quad (3)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6\right)a_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i \quad (4)$$

Quando as Eqs. de 1 a 4 são resolvidas, podemos obter os valores de a_2 , a_1 e a_0 do polinômio $y = a_2 x^2 + a_1 x + a_0$, assim fazendo o ajuste mais adequado ao conjunto de pontos (x, y) (Gilat e Subramaniam, 2008).

2.2. Otimização

Após a concretização do ajuste de curvas, e a função objetivo sendo conhecida, partiu-se para a otimização do perfil. Esta tarefa foi feita utilizando o recurso “fminbnd”, que é residente do MATLAB. Como requerido pela ferramenta, a função objetivo foi introduzida. O dado de saída obtido foi um valor de ângulo de ataque em que o coeficiente de sustentação para o perfil será máximo.

2.3. Parâmetros de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal

A forma na qual a energia extraída é convertida em energia útil, depende do design e da turbina em questão. Uma grande parcela dos conversores de energia possui um rotor com pás a certa rotação (Ω). Esta velocidade angular pode ser calculada através da Eq. 5. As pás varrem a área do disco, e em termos de sua aerodinâmica desenvolvem uma diferença de pressão através do disco (Burton et al., 2001).

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \quad (5)$$

O cilindro de vórtice tem uma vorticidade superficial que segue um caminho helicoidal, com ângulo de helicóide ϕ , também conhecido como ângulo de escoamento de ponta de pá (Burton et al., 2001).

O ângulo de escoamento pode ser determinado pela Eq. 6. Onde (a) e (a') são os fatores de indução normal e tangencial.

$$\tan(\phi) = \frac{(1-a)U_\infty}{(1+a')\Omega R} \quad (6)$$

A suposição básica da Teoria de Momento de Elemento de Pá que a força de um elemento de pá é unicamente responsável pelas mudanças na quantidade de movimento do ar que escoar através do disco varrido pelo elemento. Portanto se estabelece que não há interação radial entre os fluxos através do disco – uma condição que é restrita, apenas ocorre se o fator de indução axial não variar radialmente. O coeficiente de força normal nas pás é mostrado na Eq. 7 (Burton et al., 2001).

$$C_x = C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi) \quad (7)$$

Esta teoria também serve para equacionar algumas das mudanças sofridas pela quantidade de movimento do fluxo de ar através das turbinas, com forças atuando sob as pás. O fator de indução normal (a) (Eq. 8) é um dos responsáveis por alteração na quantidade de movimento do escoamento de ar através do rotor da turbina (Symons, 2009).

$$4\pi Ra = \frac{1}{2} B \frac{(1-a)}{\sin^2(\phi)} c C_x \quad (8)$$

A força contida no fluxo de ar fica concentrada no disco atuador. A potência que a turbina extrai da corrente de ar está expressa de forma percentual na Eq. 9. Onde C_p é o coeficiente de potência, o quanto de energia que a turbina pode aproveitar do vento (Burton et al., 2001).

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (9)$$

A turbina eólica, mecanicamente, absorve potência das correntes de vento, ela transfere essa energia por intermédio dos eixos rotativos da turbina. Tais eixos necessitam estar dimensionados para transmitir exatamente esta quantidade de potência. Quando o eixo é submetido ao torque, o seu material sofre forças internas ou pressões. Essas pressões são denominadas estresse, na qual sua dimensão é dada em Pa ou N/m². O torque gerado na turbina não será completamente aproveitado para converter energia cinética do vento em mecânica, o seu módulo será multiplicado por um fator chamado coeficiente de torque (C_t), expresso na Eq. 10 (Pinto, 2013).

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (10)$$

O torque da turbina eólica varia com o quadrado da velocidade. A parcela do torque aproveitada efetivamente pela turbina encontra-se relacionando a sua expressão com o coeficiente de torque, podemos ver esta relação na Eq. 11 (Pinto, 2013).

$$T = \frac{C_t}{2} \frac{\rho A U_\infty^2 D}{2} \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Eq. 12 é a função objetivo que governa o coeficiente de sustentação do perfil em relação ao seu ângulo de ataque. Diante desta expressão, foi encontrado o ângulo de ataque do perfil, para que o coeficiente de sustentação seja o maior possível para as condições específicas de escoamento. A hipótese de um perfil que apresenta características ótimas torna factível um aumento na geração de energia por uma turbina eólica.

$$C_l = -0.0026\alpha^2 + 0.0923\alpha + 1.8295 \quad (12)$$

Para avaliarmos o possível incremento nos torques das turbinas para cada perfil, fez-se necessário a determinação e a estimativa de alguns parâmetros iniciais. A Tab.1 lista os valores referentes à turbina eólica, esses dados são os mesmos, tanto para a hipótese do perfil ótimo, quanto para o perfil convencional. Tendo essas variáveis como ponto de partida, o torque para os dois perfis pode ser calculado.

Tabela 1: Dados preliminares da turbina

Velocidade do vento	U	6.5 m/s
Raio do rotor / Número de pás	R / B	1 m / 3
Densidade do ar / Corda do perfil	ρ / c	1.225 kg/m ³ / 0.21 m
Coeficiente de potência / Razão de velocidade na ponta da pá /	C_p / λ	0.49 / 7

Os coeficientes de sustentação e arrasto do perfil otimizado partiram dos recursos numéricos explanados anteriormente. Já os coeficientes aerodinâmicos do perfil convencional foram estipulados a partir das curvas das figuras 2 e 3. O coeficiente de potência foi estimado pela visualização do mapa da Fig. 4, entretanto tal parâmetro foi recalculado para verificar a exatidão do valor adotado inicialmente.

Subsidiado pelas variáveis determinadas acima e os dados da Tab. 1, tornou-se possível calcular o coeficiente de torque, que possibilita conhecer o torque efetivo do rotor eólico. O torque dos rotores para ambos os perfis foi calculado pela Eq. 11. Todos os dados para os rotores, considerando a influência de cada perfil estão relacionados na Tab. 2.

Tabela 2: Parâmetros do rotor para ambos os perfis

	Perfil otimizado	Perfil convencional
Ângulo de ataque (α)	-8°	-4°
Coeficiente de sustentação (Cl)	0.9247	1.3
Coeficiente de arrasto (Cd)	0.13	0.23
Coeficiente de potência (Cp)	0.46	0.35
Coeficiente de torque (Ct)	0.06571	0.05
Torque (T)	5.3419	4.0648

Máquinas de sustentação utilizam as forças de sustentação para gerar energia e máquinas de arrasto usam as forças de arrasto. As turbinas eólicas de eixo horizontal caracterizam-se por máquinas de sustentação (Pinto, 2013).

Embora a força de sustentação contribua na geração de potência em turbinas eólicas de eixo vertical, um coeficiente de sustentação elevado não implicará necessariamente em produzir mais energia. A sustentação aumenta e o arrasto decresce até certo ângulo de ataque, além desse limiar, a sustentação continua a crescer, porém o arrasto aumentará expressivamente. Então, um coeficiente de sustentação alto demais não quer dizer uma turbina mais eficiente, pois o coeficiente de arrasto também será elevado.

A metodologia de otimização proposta neste trabalho encontra um coeficiente de sustentação para o perfil, onde a relação Cl/Cd favoreça o torque no rotor, conseqüentemente incrementando a potência gerada pela turbina eólica.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo otimizar o desempenho de um rotor eólico, estabelecendo valores ótimos para os coeficientes aerodinâmicos do perfil utilizado. A metodologia de otimização proposta neste artigo fundamenta-se em métodos numéricos empregados em diversas áreas da engenharia, que se mostraram versáteis, a ponto de serem ferramentas de análise em energia eólica e em segmentos afins. A influência imposta pela camada limite atmosférica não foi considerada nesta pesquisa. O valor apontado pela otimização, não significa que é o maior, porém o desejável para produzir o torque de mais elevada magnitude no rotor, e por fim gerar mais potência na turbina eólica. Os resultados deste artigo foram satisfatórios, tendo em vista que os esforços para aprimorar as formas de extração de energias renováveis são absolutamente válidos, já que o mundo está buscando cada vez mais fazer com que as energias limpas tenham uma grande fatia nas matrizes energéticas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao UDF - Centro Universitário do Distrito Federal pela concessão de recursos laboratoriais e computacionais, que foram utilizados para a realização deste artigo.

6. REFERÊNCIAS

- Abbott, Ira H. & von Doenhoff, A. E.. Report nº 824: Summary of Airfoil Data. Langley Memorial Aeronautical Laboratory. Langley Field – Va, 1945.
- Abbott, Ira H. & von Doenhoff, A. E.. Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data, New York: Dover: 1949.
- Burton, Tony; Sharpe, David; Jenkins, Nick; Bossanyi, Ervin. Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, Ltd. England, 2001.
- Da Silva, Amanda Briggs, 2013. “Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas”. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Gilat, Amos & Subramaniam, Vish. Métodos Numéricos para Engenheiros e Cientistas. 1ª Ed, ARTMED EDITORA S.A. Porto Alegre-RS, 2008.
- Ministério de Minas e Energia. “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro”. Brasília, 2001.
- M. White, Frank. Fluid Mechanics. 7ª ed, McGrall-Hill. New York, 2011.
- Pinto, Milton. Fundamentos de Energia Eólica. 1ª ed, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro - RJ, 2013.

Sanson, Diego Moulin, 2006. Projeto Básico de um Sistema Aerogerador. Projeto de Graduação. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

Symons, Digby. Wind Turbine Blade Design. Disponível em:

http://www2.eng.cam.ac.uk/~hemh/climate/P8_Blade_Design_Student_Handout_2009.pdf,

Acesso em 31 de março de 2016.

Weber Mendonça, Melissa. Matlab Avançado. Disponível em:

http://mtm.ufsc.br/~melissa/arquivos/matlabpet/apostila_curso_matlab.pdf,

acessado em 30 de março de 2016.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo artigo.

AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF WIND ROTORS

Fábio Matos Kayser, fabio_mk_66@hotmail.com¹

Hélio de Assis Pegado, helioeng@hotmail.com²

Leonel Leonardo Delgado Morales, leonel.morales@udf.edu.br³

^{1,2,3}UDF-Centro Universitário do Distrito Federal, Setor de Edifícios Públicos Sul, Eq 704/904, Conj. A – Asa Sul, Brasília – DF – CEP: 70390-045

Abstract. *The studies in the wind energy are considered relevant nowadays, In view of the growing demand of clean energy sources. This way, this research intends to increase de energy picked-up through the blades of a wind rotor. Therefore, was made a study related to the aerodynamic airfoils, and their relevant proprieties in wind energy production. A numerical method was applied to optimize the airfoil of the blades rotor. That optimization was started to create an objective function the rule the airfoil lift coefficient (Cl) with its angle of attack. The computational process to search for the optimum value was accomplished by the MATLAB. To show that was a possible performance increase of the rotor, its torque was calculated considering the usual airfoil, and the optimized airfoil. After that, the torques were compared to corroborate the presented methodology in this research.*

Keywords: Rotor, Optimization, Wind Energy, Aerodynamic Airfoil.