

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESEMPENHO DE PERFIS AERODINÂMICOS PARA AEROGERADORES

Felipe Cafezeiro Plech, fcplech@gmail.com¹

Luzia Aparecida Tofaneli, luzia.tofaneli@fieb.org.br¹

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

¹ Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã, Salvador-BA, CEP: 41.650-010, www.fieb.org.br/senai

Resumo: Devido à grande demanda de energia elétrica no cenário mundial e a busca por fontes sustentáveis para complementar a matriz energética brasileira, a energia eólica vem ganhando bastante espaço no país e no mundo. O Brasil apresenta uma configuração renovável-térmica, atualmente com uma capacidade de geração eólica de 8,7 GW, o que representa 6,2% da totalidade da energia gerada no país. Grande parcela dos equipamentos utilizados em aerogeradores no país é de origem europeia ou americana, fabricados para os regimes eólicos dessas regiões, limitando a eficácia da geração de energia. Esses equipamentos utilizados em outros regimes de ventos, como o regime brasileiro, fazem com que a turbina tenha uma menor produtividade, já que a eficiência de um aerogerador é proveniente da interação aerodinâmica entre os ventos locais e a geometria do rotor. Assim, para gerar energia elétrica a partir dos ventos com maior eficiência no Brasil é preciso desenvolver pesquisas aerodinâmicas nessa área. O uso de softwares de fluidodinâmica computacional estão sendo cada vez mais utilizados para melhorar o desempenho de turbinas por meio de análises aerodinâmicas, já que seus resultados são bastante próximos dos reais e reduzem o custo de experimentos em túneis de vento. O objetivo do trabalho é fazer uma análise de perfis aerodinâmicos obtendo os coeficientes de arrasto, sustentação, distribuição da pressão e a comparação da eficiência dos mesmos com a literatura, para aplicação em turbinas eólicas. Para a realização das análises, será utilizado o método de Fluidodinâmica Computacional (CFD, Computational Fluid-Dynamics) do software ANSYS CFX utilizando o modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport) para o cálculo das forças presentes no aerofólio, dessa forma determinando sua eficiência.

Palavras-chave: Desempenho, CFD, Aerofólio, Aerogerador

1. INTRODUÇÃO

Segundo Hansen (2000), a energia contida no vento vem sendo utilizada desde a propulsão dos barcos a vela, dos moinhos para moer grãos e bombeamentos de água em áreas inundadas pelo oceano. Apenas no começo do século XX, apareceram as primeiras turbinas eólicas com finalidade de gerar energia elétrica de corrente contínua, tendo assim uma grande perda durante a transmissão da mesma. Por conta disso, as turbinas só podiam ser construídas nos locais próximos ao ponto de utilização de energia.

Visto que as turbinas não podiam ser construídas longe dos usuários, as pesquisas se voltaram para geradores movidos a Diesel como principal fonte de eletricidade. No entanto, após duas guerras mundiais, quando os combustíveis fósseis estavam escassos, abriu-se um espaço para o avanço das tecnologias movidas pelo vento.

Mesmo após esse evento, as turbinas eólicas só obtiveram um resultado significativo na década de 50, quando Johannes Juul introduziu o conceito Danish, construindo o modelo Gedser, o aerogerador mais utilizado hoje. O modelo constitui de três pás conectadas a um motor assíncrono de corrente alternada, girando em velocidade praticamente constante. Com a crise do petróleo em 1973, os aerogeradores voltaram a ser investigados como uma larga fonte de energia, principalmente por países que desejavam ser mais independentes do petróleo. O efeito desse evento fez com que atualmente a indústria de geração de energia eólica tenha um aumento significativo ao ano.

Devido a fatores de poluição ambiental e escassez de combustíveis fósseis, o interesse em fontes renováveis vem aumentando consideravelmente, porém a que mais se destaca economicamente na maioria dos casos é a eólica. O Brasil produziu, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014), a partir de fontes eólicas, 6.579 GWh em 2013, valor 30,3% maior que o produzido em 2011, mostrando assim um enorme crescimento no setor no país. A Bahia se destaca pelo maior potencial dessa tecnologia dentre todos os outros estados, com projetos em implantação e operação. O estado, segundo o Atlas Eólico do Estado da Bahia (2013), possui um potencial eólico de 70 GW.

Segundo Ranking Mundial de Energia e Socioeconomia (2015) o Brasil se tornou o 10º maior gerador de energia eólica do mundo, representando aproximadamente 8,3% de toda a energia produzida no país. Apesar dessa discrepância comparada a fonte hidroelétrica, com uma parcela de geração de 62,5%, a produção de energia elétrica a partir ventos vem crescendo, demonstrando a viabilidade desse empreendimento no país.

A eficiência de um aerogerador é fruto da interação aerodinâmica entre a geometria do rotor do equipamento e o regime de ventos do local da instalação. Diversos estudos são realizados para obter maior eficiência dos aerogeradores por meio do uso de CFD (Computational Fluid-Dynamics) e meios experimentais com túneis de vento, porém apenas uma pequena parcela dessas pesquisas é voltada para o regime de ventos no Brasil.

As análises de alguns perfis como o NACA 0012 foram realizadas por Santos (2012), na qual é utilizado os *softwares* ANSYS FLUENT e EasyCFD_G para o estudo de perfis da série NACA para aplicação em turbinas eólicas de eixo vertical. Foram avaliados a eficiência e robustez dos métodos numéricos aplicados nos programas de volumes finitos, através de resultados obtidos em simulação numérica de escoamentos em torno de perfis.

Com base no exposto, este trabalho apresenta um estudo de perfis aerodinâmicos de pás de aerogeradores, para determinação de características de arrasto e sustentação bem como a distribuição de pressão em sua superfície através do método de CFD do *software* ANSYS CFX. Foi utilizado o modelo de turbulência SST (*Shear Stress Transport*) e comparando com dados experimentais presentes na literatura. Nesse artigo serão apresentados os resultados da análise de dois aerofólios, NACA 0012 e AH-93-W-215.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelagem Computacional

Para obtenção da solução das equações descritivas do escoamento estudado uma abordagem numérica foi adotada. O *software* ANSYS CFX™ foi utilizado para através do método dos volumes finitos, resolver as equações de continuidade e de Navier-Stokes, descritas nas Eqs. (1) – (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica, p é pressão, t é tempo; x , y e z são, respectivamente, as três direções cartesianas; u , v e w são, respectivamente, as velocidades nas direções x , y e z ; $\vec{u}$ é o vetor tridimensional de velocidade; μ é a viscosidade do fluido; S_{Mx} , S_{My} e S_{Mz} são os termos fontes de momento nas direções descritas em subscrito.

Na modelagem computacional, o *scheme* de interpolação utilizado foi o *high resolution*. Segundo o manual de uso do ANSYS CFX™, este é o indicado para obtenção de resultados finais.

O modelo de turbulência utilizado para a realização das simulações foi o SST (*Shear Stress Transport*), que de acordo com Menter et al. (2003) permite uma avaliação muito precisa do escoamento nas regiões próximas as paredes. O modelo é do tipo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e foi proposto por Menter (1998), utilizando o equacionamento de dois outros métodos, o k- ϵ e o k- ω . Sua formulação se dá de forma simples. Na região externa do escoamento, ou seja, distante da camada limite do objeto a ser estudado, utiliza-se a formulação robusta do modelo k- ϵ . Nas regiões próximas as paredes do corpo, o modelo utiliza as equações de transporte do modelo k- ω .

Vale ressaltar que a justificativa da escolha do modelo SST, foi devido à necessidade de resultados precisos das forças presentes no aerofólio, que são geradas pela distribuição de pressão negativa na parte superior do mesmo próximo as paredes, uma vez que o modelo SST se mostra mais eficaz nessas situações.

2.2. Forças Aerodinâmicas

Escoamento externo ao redor de um objeto gera forças aerodinâmicas no mesmo. A força de sustentação é perpendicular ao vetor da velocidade relativa, enquanto a força de arrasto é paralela ao mesmo.

A força de arrasto é causada pela fricção entre o fluido e o corpo e pela diferença de pressão causada pelo movimento do fluido. Em um escoamento ao redor de uma placa plana o arrasto é em sua maioria gerado pela fricção. Em corpos com geometrias irregulares, como aerofólios, o arrasto também é gerado por um gradiente de pressão

negativo na superfície superior do mesmo. A distribuição da pressão em um corpo depende de sua geometria, e geralmente é exposta através de um coeficiente de pressão, C_p definido pela Eq. (5).

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (5)$$

onde ρ é a massa específica do fluido escoante, V_∞ é a velocidade relativa do fluido num ponto distante do corpo, P é a pressão absoluta no local, e P_∞ é a pressão relativa.

Os efeitos da força de arrasto em um objeto podem ser expostos também por um coeficiente de arrasto, C_d , mostrado na Eq. (6).

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (6)$$

onde D é a força de arrasto e A é a área frontal do objeto em relação ao escoamento. A força de sustentação pode ser representada de forma parecida ao arrasto, e geralmente é exposta pelo coeficiente de sustentação, C_l , apresentado na Eq. (7).

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A} \quad (7)$$

Na qual L é a força de sustentação e A é a área superficial do aerofólio.

2.3. Geometrias Analisadas

Para as simulações foram escolhidos dois aerofólios segundo suas geometrias para serem analisados. O primeiro foi o NACA 0012, perfil aerodinâmico simétrico, usado geralmente como referência para resultados de outras simulações. O segundo foi o AH-93-W-215, perfil não simétrico utilizado em aerogeradores de médio porte. As geometrias dos aerofólios AH-93-W-215 e NACA 0012 são apresentadas nas Fig. 1 e Fig. 2, respectivamente.

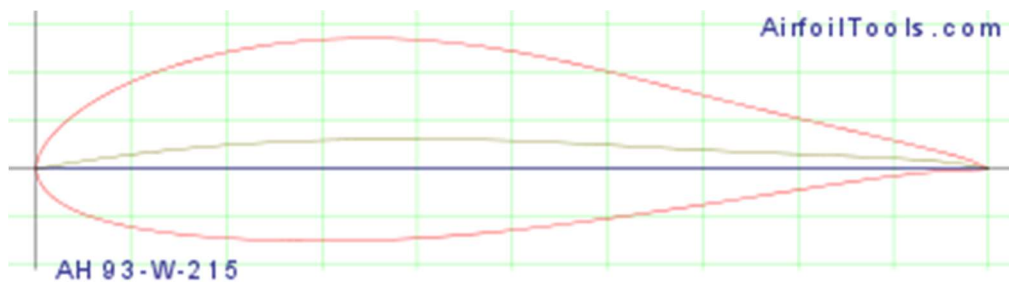


Figura 1. Geometria do aerofólio AH-93-W-215 de AirfoilTools.

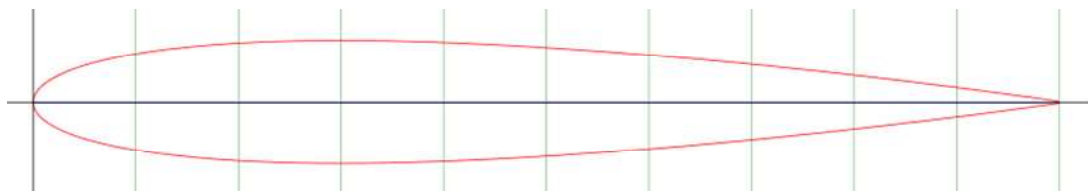


Figura 2. Geometria do aerofólio NACA 0012 de AirfoilTools.

2.4. Desenvolvimento da Malha

As geometrias dos perfis aerodinâmicos utilizados foram desenvolvidas no SolidWorks™, a partir das coordenadas polares disponíveis no site da AirfoilTools. Foi feito um plano a partir de uma curva XY do perfil no *software* que depois foi realizada uma extrusão e redimensionada para gerar um objeto em 3D.

O desenvolvimento da malha para as simulações foi feito de forma simples. Utilizou-se uma geometria com a área frontal curvada para especificar a entrada do volume de controle. Na mesma foi feito um corte do formato do aerofólio desenvolvido no SolidWorks™. Após o volume de controle pronto, pode-se dar início a implementação da malha.

Para a construção da malha é necessário dividir o domínio em volumes de controle discretos. São definidos pontos na área que deseja simular, os quais são rodeados por os volumes de controle. A malha desenvolvida próxima ao aerofólio precisa ser mais refinada, para obter resultados mais precisos das forças presentes no perfil. Da mesma forma, a malha atrás do mesmo tem que ser refinada para que possa observar melhor o escoamento do fluido depois de passar pelo perfil.

Ao redor da geometria do aerofólio foi necessário fazer uma malha para melhor analisar a camada limite no perfil. A representação da malha completa e da camada limite é apresentada nas Fig. 3.

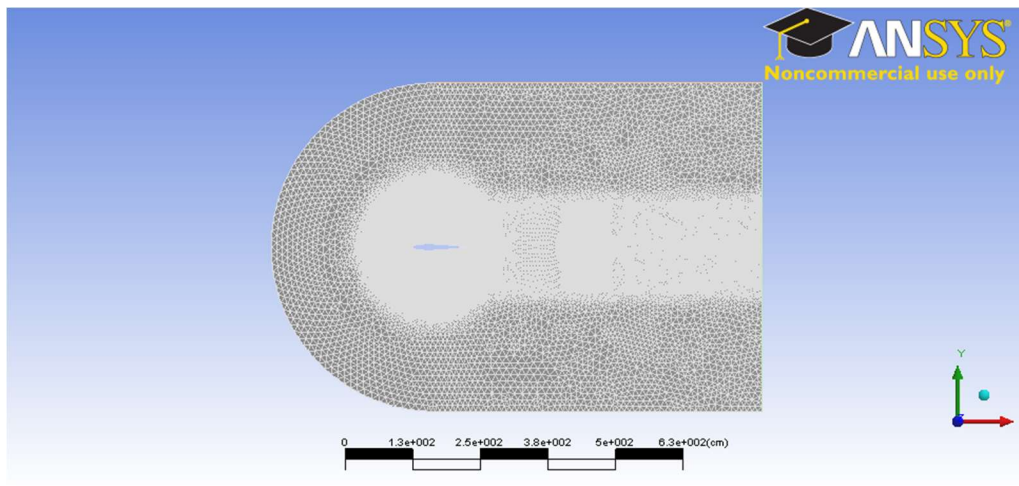


Figura 3. Geometria e malha para o perfil NACA 0012 com $\alpha=0^\circ$.

A Figura 4 exibe detalhe da malha nas proximidades do aerofólio. Há um refino de malha nessa região para que a distância adimensional do primeiro nó à parede do aerofólio (y^+) seja menor do que 2. Com esse valor o modelo de turbulência SST utiliza uma abordagem de baixo Reynolds prevendo com maior fidelidade a camada limite.

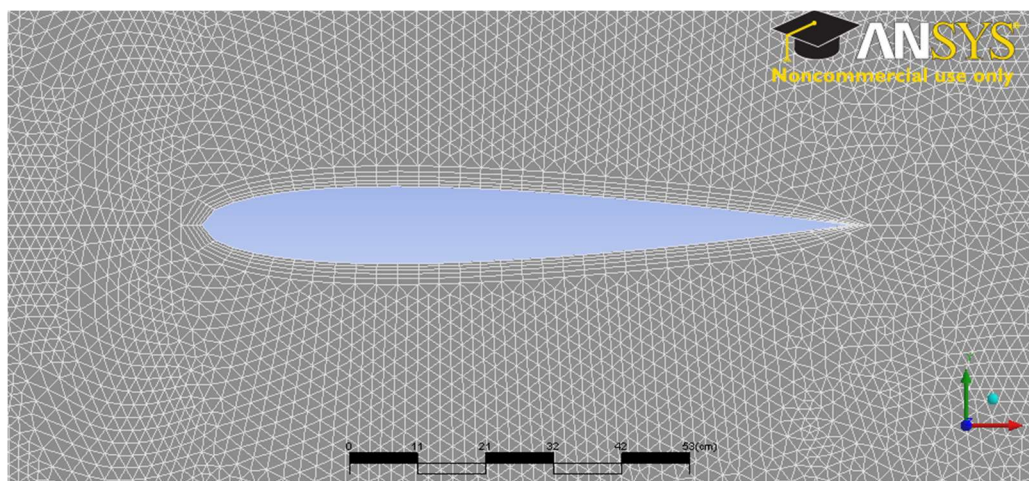


Figura 4. Malha da Camada Limite.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise das forças de sustentação, pressão e da distribuição de pressão nos aerofólios, foram definidos três valores de número de Reynolds para as simulações e dois ângulos de ataque (α) para serem analisados. Os dois perfis foram simulados nos ângulos de 0° e 5° e para números de Reynolds de: 1×10^5 , 2×10^5 e 3×10^5 , para cada um dos

ângulos. As análises foram feitas em um escoamento 2D sobre os aerofólios utilizando o *software* ANSYS CFX, versão 12.1.

As condições das simulações do escoamento foram definidas conforme mostra a Tab. 1.

Tabela 1. Condições das Simulações para os dois Aerofólios.

Fluido	Ar Ambiente
Temperatura (C°)	25
Massa Específica do Ar em 25C° (kg/m³)	1,1839
Viscosidade Absoluta (Pa.s)	0,0000172
Corda dos Aerofólios (m)	1

A partir dos dados obtidos das simulações, foi possível plotar os gráficos do Coeficiente de Pressão (C_p) dos aerofólios. A variação no número de Reynolds não gerou diferença no coeficiente de pressão.

Para o NACA 0012, em um ângulo de ataque de 0°, os valores da curva C_p foram iguais para a superfície superior e inferior do aerofólio, evidenciando sua simetria. A simulação com um ângulo de ataque de 5° gerou uma diferença de pressão entre as duas superfícies do perfil que pode ser visto na Fig. 5, fazendo com que a curva C_p abrisse. Percebe-se na Fig. 6 e na Fig. 7 o impacto do ângulo de ataque e o surgimento do gradiente de pressão negativo na superfície superior do perfil. A mudança do número de Reynolds nas simulações gerou uma variação menor que 0,1 nos valores do C_p .

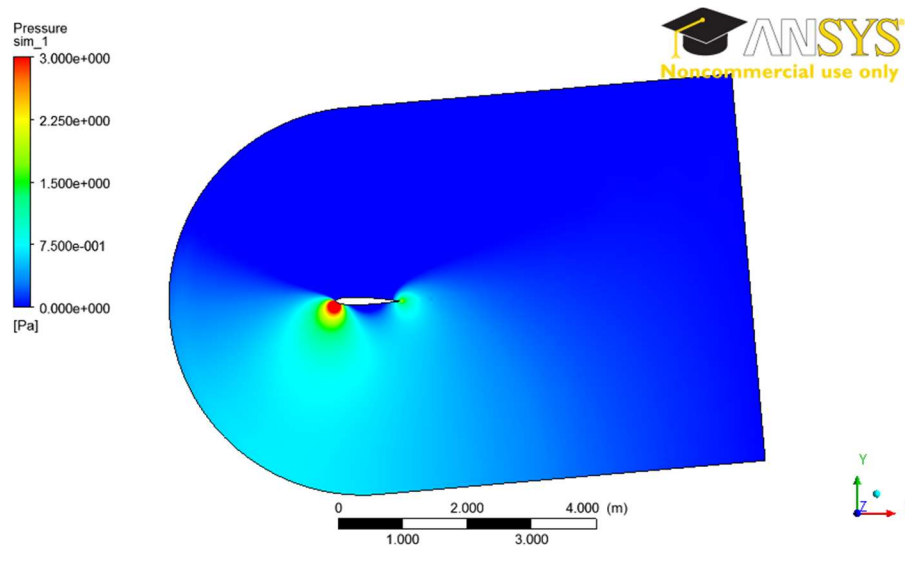


Figura 5. Gradiente de pressão em torno do NACA 0012 com $\alpha=5^\circ$.

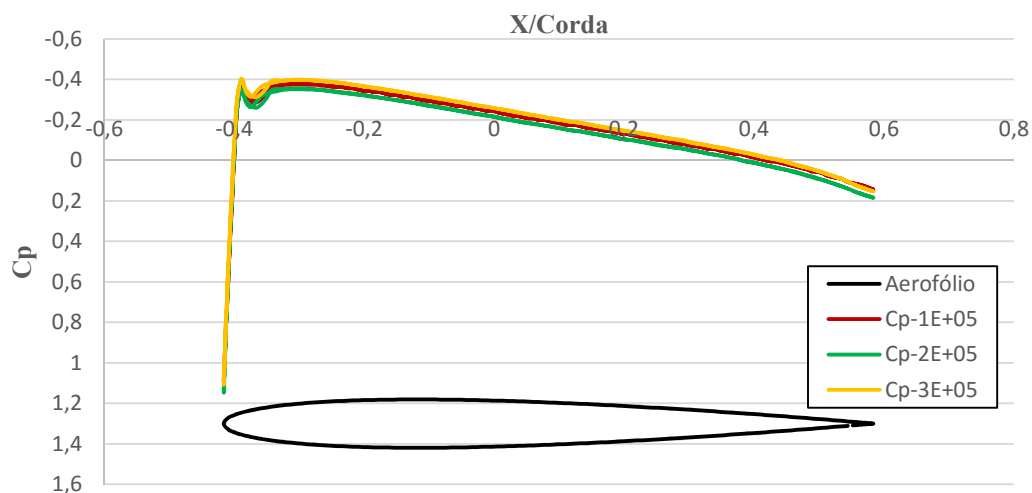


Figura 6. Comparação dos Coeficientes de Pressão – NACA 0012 para números de Reynolds: 1E+05, 2E+05 e 3E+05 com $\alpha=0^\circ$.

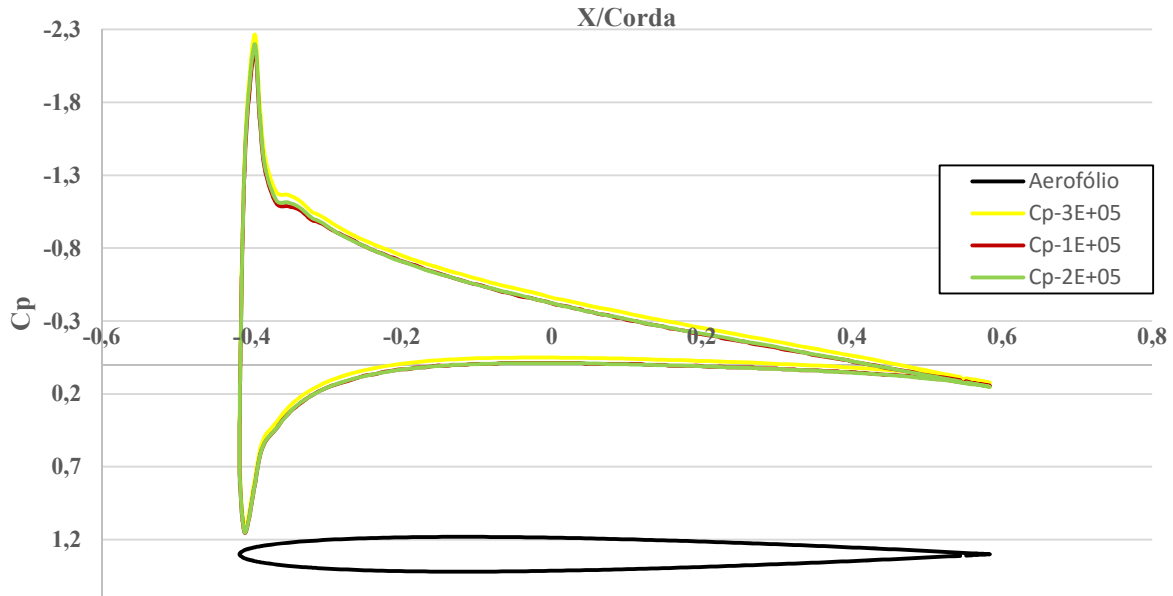


Figura 7. Comparação de Coeficiente de Pressão – NACA 0012 para números de Reynolds: 1E+05, 2E+05 e 3E+05 com $\alpha=5^\circ$.

As simulações para o perfil NACA 0012, tiveram como resultado valores muito próximos dos realizados em túneis de vento pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Foi obtido um valor do Coeficiente de Sustentação (C_l), de 2,92% menor que o experimental para um Ângulo de Ataque (α) de 5° .

Os resultados do Coeficiente de Sustentação e do Coeficiente de Arrasto são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Resultados das Simulações do perfil NACA 0012.

Ângulo de Ataque (α)	Número de Reynolds - Re	Coeficiente de Sustentação - C_l	Coeficiente de Arrasto - C_d	C_l/C_d
0°	1×10^5	0,0	0,020	0,0
0°	2×10^5	0,0	0,018	0,0
0°	3×10^5	0,0	0,016	0,0
5°	1×10^5	0,49	0,027	18,1
5°	2×10^5	0,49	0,025	19,8
5°	3×10^5	0,50	0,023	21,3

O aerofólio AH-93-W-215 gerou uma maior diferença de pressão entre as suas superfícies devido a sua não simetria. O mesmo teve uma curva C_p aberta nas simulações com o ângulo de ataque de 0° . Nas simulações com $\alpha=5^\circ$, o AH-93-W-215 teve uma eficiência próxima ao do NACA 0012, porém ainda assim continuaram maiores. Os gráficos de C_p do AH-93-W-215 dos ângulos de 0° e 5° são apresentados na Fig.8 e Fig.9, respectivamente.

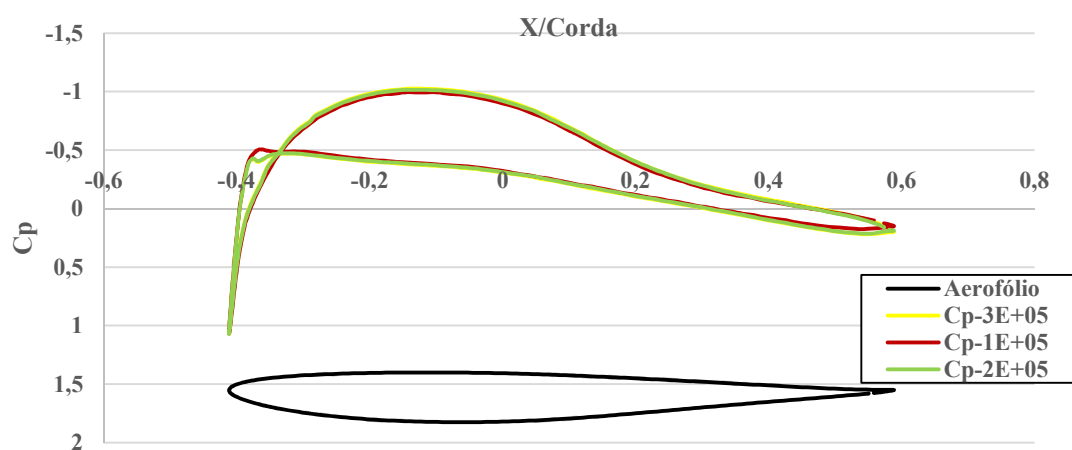


Figura 8. Comparação dos Coeficientes de Pressão C_p - AH 93-W-215 para números de Reynolds: $1E+05$, $2E+05$ e $3E+05$ com $\alpha=0^\circ$.

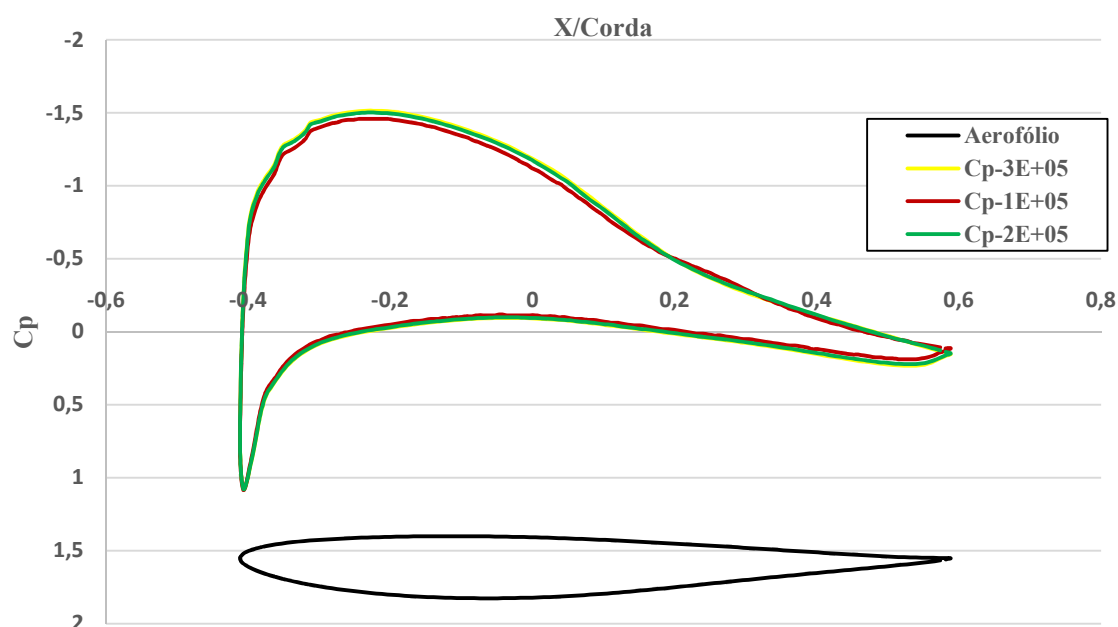


Figura 9. Comparação dos Coeficientes de Pressão C_p - AH 93-W-215 para números de Reynolds: $1E+05$, $2E+05$ e $3E+05$ com $\alpha=5^\circ$.

Os resultados do Coeficiente de Sustentação e do Coeficiente de Arrasto do perfil AH-93-W-215 são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Resultados das Simulações do perfil AH-93-W-215.

Ângulo de Ataque (α)	Número de Reynolds - Re	Coeficiente de Sustentação - C_l	Coeficiente de Arrasto - C_d	C_l/C_d
0°	1×10^5	0,29	0,025	11,4
0°	2×10^5	0,32	0,023	13,9
0°	3×10^5	0,33	0,203	16,2
5°	1×10^5	0,80	0,032	24,8
5°	2×10^5	0,84	0,028	29,7
5°	3×10^5	0,85	0,027	32,0

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas simulações de dois aerofólios em um escoamento 2D, para isso foi utilizado o modelo de turbulência SST para melhor analisar as condições de contorno dos mesmos. Os resultados obtidos destas simulações são bem satisfatórios comparando-os com resultados da literatura.

O aumento do número de Reynolds teve impacto na eficiência dos aerofólios, aumentando a mesma conforme o Reynolds. Foi possível notar também a maior eficiência do aerofólio AH-93-W-215 em relação ao NACA 0012 devido a sua geometria não simétrica, possibilitando o surgimento um alto gradiente de pressão negativo na superfície superior. Como o NACA 0012 é um perfil simétrico, o gradiente de pressão na parte superior do aerofólio não é tão diferente da superfície inferior, dessa forma não gerando uma diferença de pressão significativa. Essa simetria faz com que o NACA 0012 tenha uma eficiência praticamente nula em um ângulo de ataque de 0° , diferente do AH-93-W-215.

Pode-se concluir que as variáveis que mais impactaram nos resultados foram a geometria dos aerofólios e o ângulo de ataque utilizado, já que todas as simulações foram feitas no mesmo regime de escoamento, neste caso laminar.

Uma vez constatada a viabilidade da metodologia para levantar dados de coeficientes de arrasto e sustentação num perfil será possível, em trabalhos futuros, avaliar computacionalmente o efeito dos ventos brasileiros no desempenho de um rotor de aerogerador.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao SENAI/CIMATEC e a FAPESB pelo suporte financeiro durante a preparação deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014, “Balanço Energético Brasileiro” Ministério de Minas e Energia – MME.
- Freire, A.P., 1990, “Teoria de Camada Limite”, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Grasso, F., 2012, “Development of Thick Airfoils for Wind Turbines”, AIAA, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville, TN, USA.
- Hansen, M.O., 2008, “Aerodynamics of Wind Turbines”, 2ª Edition, pp. 1-26.
- Martins, D.A., Padilla, E., Neto, A.S., “Implementação do Modelo de Turbulência $\kappa\text{-}\Omega$ SST em uma Cavidade Tridimensional”, Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica.
- Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R., 2003, “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model”, Otterfing, Germany.
- Menter, F.R., 1994, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, AIAA Journal.
- Santos, A.A., 2012, “Simulação Numérica de Perfis Alares Utilizados em Aerogeradores de Eixo Vertical”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Santos, A.A., Boas, L.D., Tofaneli, L.A., Filho, M.A., Neves, P.R., Oliveira, T.D., 2013, “Atlas Eólico Bahia”.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

AERODYNAMIC PERFORMANCE OF AIRFOILS FOR WIND TURBINES

Felipe Cafezeiro Plech, fcplech@gmail.com¹

Luzia Aparecida Tofaneli, luzia.tofaneli@fieb.org.br¹

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

¹ Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã, Salvador-BA, CEP: 41.650-010, www.fieb.org.br/senai

Abstract. Due to the great demand of electricity on the world scene and the search for renewable sources to complement the Brazilian energy matrix, the wind power is becoming more popular in the country and the world. Brazil has a renewable-thermal energy configuration, currently with a wind power capacity of 8.7 GW, representing 6.2% of all energy generated in the country. A large portion of the equipment used in wind turbines in the country is European or American origin, made for wind regimes of these regions, limiting the efficiency of energy generation. These equipment used in Brazilian wind regimes cause the turbine have a lower productivity, since the efficiency of a wind turbine is derived from the aerodynamic interaction between the local wind and rotor geometry. Thus, to generate electricity from the wind more efficiently in Brazil is necessary to develop aerodynamic research in this area. The use of computational fluid dynamics software are being used to improve the performance of turbines by aerodynamic analysis, because the results are very close to the experimental one and reduce the cost of wind tunnel experiments. The goal of the project is to make an analysis of airfoils getting the drag coefficients, lift coefficients, pressure distribution and comparison of the efficiency with the literature for application in wind turbines. To perform the analysis, will be used the method of Computational Fluid Dynamics (CFD) of ANSYS CFX software using the SST turbulence model (Shear Stress Transport) to calculate the forces present in the airfoil, thus determining its efficiency.

Keywords: Wind Turbine, CFD, Airfoil, Performance