



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS – IEG
CURSO DE ENGENHARIA FÍSICA**

MAYARA SANTANA VIEIRA

TÍTULO:

**ANÁLISE NUMÉRICA DA APLICABILIDADE DA BIOMIMÉTICA EM UM
PERFIL AERODINÂMICO PARA A APLICAÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS.**

SANTARÉM/PA

2024

MAYARA SANTANA VIEIRA

TÍTULO:

**ANÁLISE NUMÉRICA DA APLICABILIDADE DA BIOMIMÉTICA EM UM
PERFIL AERODINÂMICO PARA A APLICAÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para
obtenção do grau no curso de Engenharia Física na
Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de
Engenharia e Geociências - IEG.

Orientador: JOSECLEY FIALHO GOES.
Coorientador: ERICK OLIVEIRA DO NASCIMENTO

SANTARÉM/PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

- V658a Vieira, Mayara Santana
Análise numérica da aplicabilidade da biomimética em um perfil aerodinâmico para a aplicação em turbinas eólicas./ Mayara Santana Vieira. - Santarém, 2024.
13 p. : il.
Inclui bibliografias.
- Orientador: Josecley Fialho Goes.
Coorientador: Erick Oliveira do Nascimento.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Bacharelado em Engenharia Física.
1. Biomimética. 2. Turbina eólica. 3. CFD. I. Goes, Josecley Fialho, *orient.* II. Nascimento, Erick Oliveira do, *coorient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 621.312136


PARECER DO ORIENTADOR

A discente, ao iniciar atividades profissionais em sua área de formação, precisou se afastar de projetos acadêmicos, mas desenvolveu, com comprometimento, um plano de trabalho que complementou seu processo de formação acadêmica. Este plano de trabalho contou com a coorientação do doutorando Erick Oliveira do Nascimento, que ofereceu suporte na elaboração e execução do estudo.

Como resultado desse plano, foi submetido um artigo completo no V Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (CoBICET). O desenvolvimento do artigo evidencia a dedicação e a capacidade técnica da discente, refletidas nos resultados alcançados.

Frente ao exposto, **meu parecer é pela aprovação do relatório.**

Santarém/PA, 10 de outubro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 JOSECLEY FIALHO GOES
Data: 10/10/2024 09:31:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

ASSINATURA DO ORIENTADOR

RESUMO

Diversos pesquisadores buscam a otimização da pás das turbinas eólicas através das soluções e estratégias da natureza. Desta forma, este trabalho visa avaliar numericamente a aplicabilidade da biomimética em um perfil aerodinâmico NACA 2410 com um tubérculo bioinspirado em uma baleia jubarte. Foi identificado o aumento do coeficiente de sustentação em até 11,23%. Portanto, a biomimética em um perfil aerodinâmico apresenta resultados promissores para aplicações como em uma turbina eólica.

Palavras-chave: Biomimética; Turbina eólica; CFD.

ANÁLISE NUMÉRICA DA APLICABILIDADE DA BIOMIMÉTICA EM UM PERFIL AERODINÂMICO PARA A APLICAÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS

Mayara Santana Vieira¹, Josecley Fialho Góes¹, Marciana Lima Góes¹, Erick Oliveira do Nascimento²

¹Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Brasil (maysantana.stm@gmail.com)

²Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil

Resumo: Diversos pesquisadores buscam a otimização da pás das turbinas eólicas através das soluções e estratégias da natureza. Desta forma, este trabalho visa avaliar numericamente a aplicabilidade da biomimética em um perfil aerodinâmico NACA 2410 com um tubérculo bioinspirado em uma baleia jubarte. Foi identificado o aumento do coeficiente de sustentação em até 11,23%. Portanto, a biomimética em um perfil aerodinâmico apresenta resultados promissores para aplicações como em uma turbina eólica.

Palavras-chave: Biomimética; Turbina eólica; CFD

INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica brasileira a partir de turbinas eólicas tem crescido ao longo dos anos e tem papel fundamental no abastecimento elétrico. Conforme pode ser observado nas Figura 1 e 2, no ano de 2021 a potência eólica instalada e o número de usinas brasileiras praticamente dobraram em relação ao ano de 2016 (ABEEÓLICA, 2021).

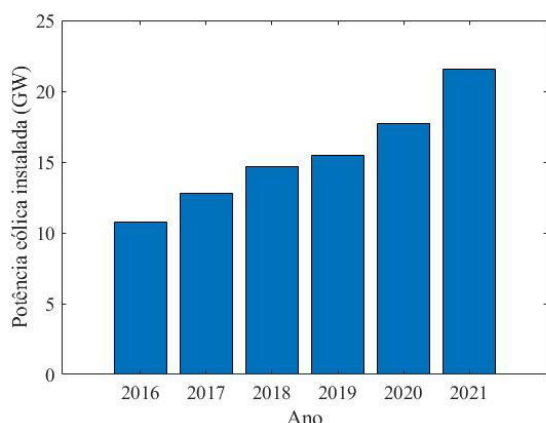


Figura 1. Potência eólica instalada no Brasil. Fonte: Elaborado a partir dos dados de Abeeólica (2021).

Além disso, a mudança do consumo de combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis tem o intuito de neutralizar a geração de gases do efeito estufa como, por exemplo, o dióxido de carbono (SILVA et al., 2024).

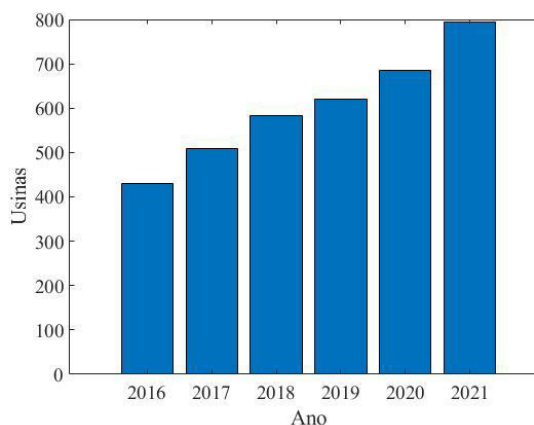


Figura 2. Número de Usina no Brasil. Fonte: Elaborado a partir dos dados de Abeeólica (2021).

Apesar dos enormes avanços no desempenho dos perfis aerodinâmicos utilizados nas turbinas eólicas, ainda se tem uma busca para melhorar o desempenho das turbinas eólicas e obter uma maior potência instalada sem que seja necessário o aumento da área dos parques eólicos, desta forma, a biomimética se apresenta como uma ferramenta promissora para a solução desse problema (HANSEN et al., 2011). Além da otimização da potência das turbinas eólicas, a biomimética pode permitir a geração de energia elétrica mesmo com baixas velocidades de vento, resultando no aumento da geração nos parques eólicos e redução dos custos (SILVA et al., 2024).

Paiva et al. (2020) realizaram um estudo numérico sobre aplicabilidade dos perfis aerodinâmicos NACA



0012, NACA 1412 e NACA 2410 em baixas velocidades de vento para turbinas eólicas de pequeno porte, cujos resultados foram comparados com os disponíveis na literatura. Foi identificado que o perfil NACA 2410 apresenta o maior coeficiente de sustentação e menor coeficiente de arrasto em comparação aos outros perfis aerodinâmicos, porém, tende a entrar na região de estol para ângulos de ataque menores, contudo este comportamento pode ser melhorado com a otimização do perfil aerodinâmico (NASCIMENTO et al., 2019).

A biomimética pode ser definida como a utilização de designs otimizados disponíveis na natureza e aplicá-los em trocadores de calor, aviões, medicina, farmácia e turbinas para a geração de energia elétrica (LIU et al., 2023). Chu e Chong (2017) utilizaram a biomimética em uma pá de rotor de uma turbina eólica de eixo horizontal. A pá do rotor foi inspirada na semente *Dryobalanops aromática* e a influência dessa variação geométrica foi avaliada através do software OpenFOAM. Foi observada que o torque induzido da turbina eólica bioinspirada foi 772% maior que a turbina eólica sem a otimização. O aumento do torque induzido permite uma melhor partida automática para a turbina.

Shi et al. (2017) avaliaram experimentalmente a influência de tubérculos na ponta da pá de uma turbina de maré. O estudo foi realizado para as condições de estol, condição ótima e sobrevelocidade. Foi identificado que os tubérculos propiciaram um maior colamento do fluido nas pás da turbina, o que pode reduzir os efeitos de perda de eficiência na ponta de pá, fornecendo maior torque e empuxo para as turbinas, mesmo na região de estol.

Wang e Zhuang (2017) realizaram um estudo numérico de uma turbina eólica de eixo vertical com ondulações para baixas razões de velocidades de ponta de pá (0 – 3,5) e três amplitudes (0,025c – 0,075c) e comprimento (0,33c – 1c) da onda. Foi identificado o aumento do coeficiente de potência em até 18,7% com a turbina com amplitude e comprimento da onda de 0,025c e 0,33c, respectivamente e razão de velocidade de ponta de pá de 2. O modelo da turbina melhorado apresentou o aumento do desempenho de potência em até 50,1% para baixas velocidades de vento (3 m/s).

Ikeda et al. (2018) realizaram o estudo através da dinâmica dos fluidos computacional de pás para turbinas eólicas bioinspiradas nas asas de pássaros que possuem força aerodinâmica e voo estável. Foi identificado as pás bioinspiradas tiveram melhor desempenho aerodinâmica que a pá original para uma ampla faixa de TSR. O incremento do coeficiente de potência da pá otimizada se torna maior com o aumento da TSR, cujo maior incremento foi de 28,4% para a TSR de 6,482. Isto ocorreu pela flexão da pá que tende a reduzir a pressão positiva no bordo de

ataque e por consequência aumentar o coeficiente de potência.

Segundo Lin e Chiu (2020), as protuberâncias presentes nas nadadeiras melhoram o desempenho da nadadeira peitoral das baleias jubarte. Desta forma, foi utilizada a biomimética em uma turbina eólica de 25 kW, cujas pás foram produzidas a partir do aerofólio FX36. Foi identificado experimentalmente que para o ângulo de ataque de 5 graus o coeficiente de potência apresentou aumento de 17,67% em relação à turbina sem as protuberâncias, cujo resultado apresenta ganhos semelhantes ao de Wang e Zhuang (2017). Joseph e Sathyabhama (2022) analisaram experimentalmente a influência de tubérculos (inspirado em uma baleia jubarte) na ponta da pá de uma turbina eólica no estol, histerese e na bolha de separação laminar. Para a pá com o tubérculo identificada uma redução mais suave do coeficiente de sustentação (CL) na região de estol quando comparada com a pá sem o tubérculo, enquanto o coeficiente de arrasto (CD) apresenta resultado semelhante, principalmente para maiores números de Reynolds.

Conforme Ke et al. (2022), a utilização de tubérculos pode apresentar vantagens aerodinâmicas, principalmente na região pós-estol. Desta forma, os autores realizaram um estudo numérico sobre a influência de tubérculos em uma turbina eólica de referência NREL fase VI com diferentes amplitudes, comprimento de onda e localização dos tubérculos na pá. Foi identificado que a presença de tubérculos pode eliminar a presença de zonas de refluxo para a velocidade de 10 m/s, e o vórtices na região de sucção podem ser reduzidos com tubérculos com pequenas relações de amplitude-comprimento de onda. Além disso, foi identificado que os resultados obtidos com a pá com os tubérculos apresentam melhores resultados para altas velocidades de vento quando comparada com a pá sem os tubérculos.

Yossri et al. (2023) realizaram um estudo através da dinâmica dos fluidos computacional de turbinas eólicas bioinspiradas nas asas de pássaros (albatroz e águia-real) e inseto (libélula) para velocidades de vento não superiores a 4 m/s. Foi observado que a turbina eólica bioinspirada na águia-real, e velocidade de vento de 4 m/s teve o aumento do coeficiente de potência de 13% em relação as outras turbinas eólicas analisadas. Além disso, foi identificado que em certos casos o aumento da intensidade da turbulência pode ser benéfico para o desempenho da turbina, pois, foi observado um aumento de 8,10% no torque gerado com a duplicação da intensidade da turbulência.

Rahnamaybahambary et al. (2024) realizaram o estudo sobre o retrofit de uma turbina eólica com winglets bioinspirados no condor-dos-andes. Foi identificado que a modificação na pá da turbina promoveu o incremento médio de 9,69% da produção de energia

para a faixa de velocidade de vento de 8 – 11 m/s. Além disso, foi observado o aumento de 8,5% na carga axial ao longo do comprimento da pá, e a presença do winglet bioinspirado casou uma recuperação de velocidade do escoamento mais compacto na região de esteira.

Conforme foi apresentado acima têm-se buscado a otimização dos perfis aerodinâmicos atuais com o intuito de melhorar o desempenho e diminuir os efeitos do estol. Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar numericamente o perfil aerodinâmico NACA 2410 com tubérculo no bordo de ataque para aplicações com baixa velocidade de vento para a aplicação em turbinas eólicas em regiões com baixas velocidades de vento.

METODOLOGIA NUMÉRICA

Na Figura 3 estão ilustrados através de uma representação esquemática o domínio e as dimensões utilizadas neste trabalho, as quais foram definidas a partir dos trabalhos de Oukassou et al. (2019), Paiva et al. (2020) e Antunes et al. (2023). O domínio possui dimensões grandes o suficiente para que os efeitos do domínio computacional não interfiram de forma significativa no campo de escoamento. Desta forma, a geometria possui comprimento de 32c e altura de 24c, em que “c” refere-se a corda do perfil aerodinâmico.

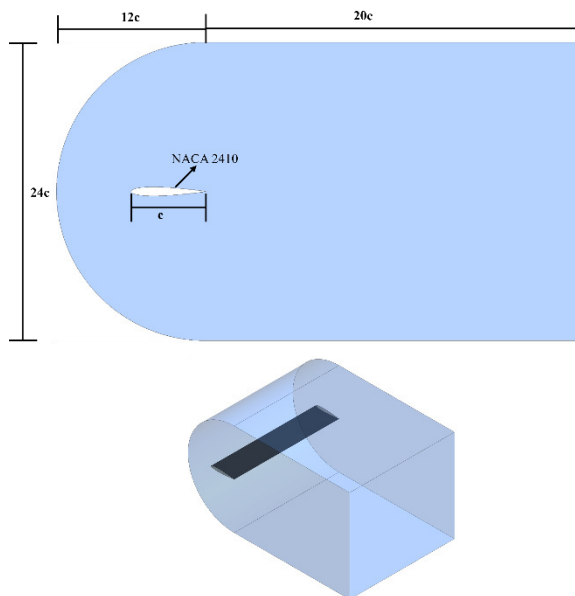


Figura 3. Representação esquemática do modelo geométrico e do domínio computacional empregado.

Na Figura 4 está ilustrado o tubérculo utilizado no perfil aerodinâmico NACA 2410. A altura (h) e a amplitude (A) do tubérculo foram definidas através do trabalho de Wang e Zhuang (2017). O tubérculo utilizado neste trabalho possui altura de 0,025c e

amplitude da onda de 0,33c, o qual é bioinspirado em uma nadadeira de uma baleia jubarte.

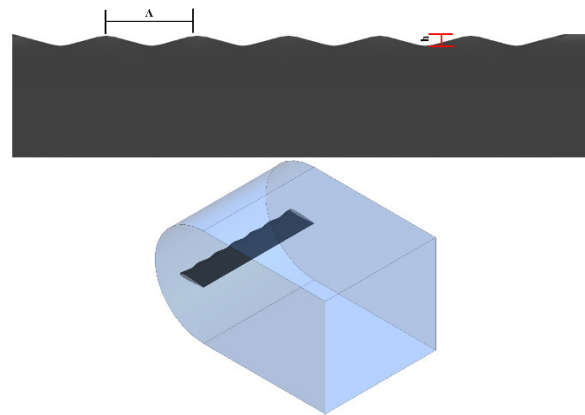


Figura 4. Representação esquemática do modelo geométrico do tubérculo empregado.

A análise numérica dos perfis aerodinâmicos com e sem o tubérculo foram realizadas para o número de Reynolds fixo em 100000, em que consiste na velocidade com magnitude de aproximadamente de 6,64 m/s na região de entrada do escoamento, enquanto nas regiões de parede foi considerada a condição de não-deslizamento e pressão nula na região de saída.

Neste trabalho o fluido de trabalho (ar) foi considerado como incompressível, newtoniano, monofásico e isotérmico. A partir dessas considerações foram utilizadas as equações de balanço da continuidade (1) e da quantidade de movimento linear (2), as quais estão implementadas no software Ansys Fluent.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

em que ρ refere-se a massa específica, u é a velocidade, x representa a coordenada cartesiana, p é a pressão, μ refere-se à viscosidade dinâmica e δ_{ij} é o delta de Kronecker (FLUENT, 2013).

Devido ao alto número de Reynolds (100000), o escoamento é considerado como turbulento, desta forma, faz-se necessária a utilização de um modelo de

turbulência para considerar as flutuações das variáveis das equações que afetam a solução do problema. Para a modelagem da turbulência foi selecionado o modelo $\kappa - \omega$ SST, pois, este modelo apresenta resultados satisfatórios na solução de problemas em que envolvam escoamento livre, em regiões próximas à parede e separação do escoamento (ROCHA et al. (2016); MOUSAVIZADEH et al., 2015; KUMAR; SAHOO, 2019). Além disso, este modelo de turbulência não é excessivamente sensível às mudanças das condições de contorno (FLUENT, 2013).

Neste modelo de turbulência empregado ($\kappa - \omega$ SST) no presente trabalho, as equações utilizadas são a da taxa de energia cinética turbulenta (κ) e da taxa de dissipação específica (ω), as quais são calculadas através das equações (3) e (4), respectivamente. Mais informações do modelo turbulências podem ser obtidas no trabalho de Wilcox (1993).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\kappa \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\kappa - Y_\kappa + S_\kappa \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

Neste trabalho as simulações numéricas foram realizadas no software Ansys Fluent, em que é empregado o método de volumes finitos para a discretização das equações descritas anteriormente (FLUENT, 2013). Além disso, foi utilizado o esquema de acoplamento pressão-velocidade Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE) para obter o campo de pressão (PATANKAR, 1980). Os termos convectivos e difusivos foram discretizados com o método upwind de segunda ordem (RAHNAMAYBAHAMBARY et al., 2024). Os métodos utilizados são amplamente empregados nas simulações numéricas de problemas que envolvam perfis aerodinâmicos, e mais informações podem ser obtidas em Fluent (2013).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seleção de um perfil aerodinâmico para a aplicação em uma turbina eólica deve ser iniciada por um estudo dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D), e a performance aerodinâmica (C_L/C_D) (SHEN et al., 2016). Desta forma, neste trabalho estão apresentados estes parâmetros para verificar a aplicabilidade dos tubérculos em um perfil aerodinâmico para aplicações em turbinas eólicas.

Para o estudo de independência de malha foram feitas três diferentes malhas estruturadas e com um maior refinamento na região próxima à parede para capturar

as flutuações das variáveis das equações de transporte, as quais são modeladas pelo modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST. Foram utilizadas malhas com 537592, 767990 e 998388 volumes para verificar a independência dos resultados dos coeficientes de sustentação e de arrasto em relação ao tamanho do volume. Para este procedimento foi utilizado o perfil aerodinâmico NACA 2410 sem a presença do tubérculo, pois, para este caso tem-se resultados disponíveis na literatura para uma comparação quantitativa. Dentre as malhas utilizadas, a malha com 767990 volumes apresenta resultados satisfatórios em comparação com os resultados de Paiva et al. (2020), além disso, a diferença com a malha 3 é mínima e não apresenta o aumento do custo computacional.

Para a validação dos resultados do perfil aerodinâmico utilizado neste trabalho, foram utilizados os dados da plataforma Airfoil Tools, assim como foi realizado por Kostas et al. (2020). Além disso, os resultados são comparados com os dados de Paiva et al. (2020) para diferentes ângulos de ataque, conforme pode ser observado na Figura 5.

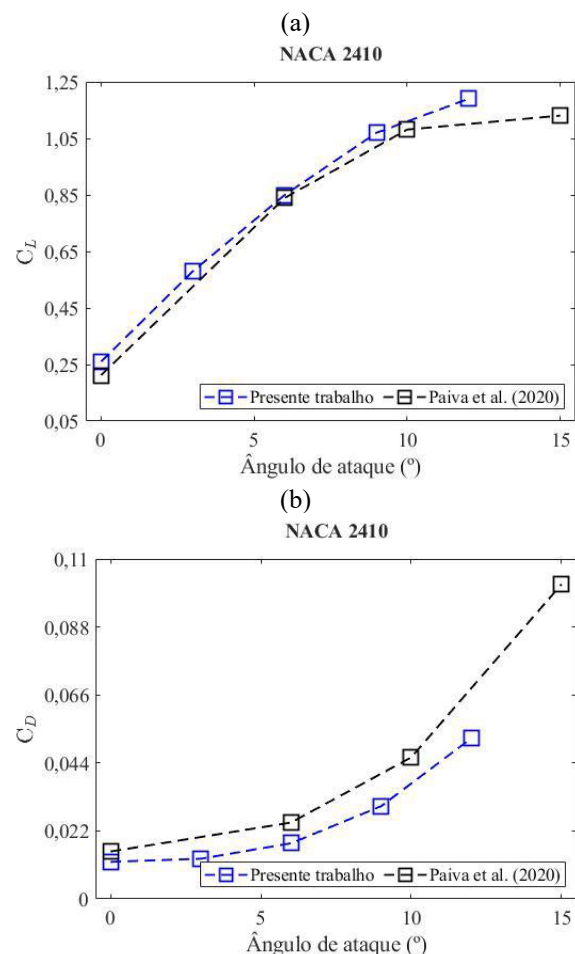


Figura 5. Validação dos coeficientes de sustentação (a) e de arrasto (b) com o trabalho de Paiva et al. (2020).

Foi identificado que os coeficientes de sustentação e de arrasto apresentam o mesmo comportamento qualitativo quanto quantitativo em relação aos resultados do trabalho de Paiva et al. (2020), portanto, a partir desses resultados será feita a comparação com os resultados com o perfil aerodinâmico com o tubérculo.

Na Figura 6 estão apresentados os coeficientes de sustentação (C_L) do perfil aerodinâmico NACA 2410 padrão (sem tubérculo) e com tubérculo para diferentes ângulos de ataque ($0^\circ - 12^\circ$). Foi identificado que ambos os perfis apresentam comportamento semelhante, principalmente para baixos ângulos de ataque, conforme também foi observado por Wang e Zhuang (2017). Para o ângulo de ataque entre 0 e 6 graus, ocorre a redução do coeficiente de sustentação em relação ao perfil padrão, porém, para 9° e 12° ocorreu o aumento do coeficiente de sustentação. O maior decremento (-2%) ocorreu para o ângulo de ataque de 3° , enquanto para 12° ocorre o maior incremento (11,23%) do coeficiente de sustentação.

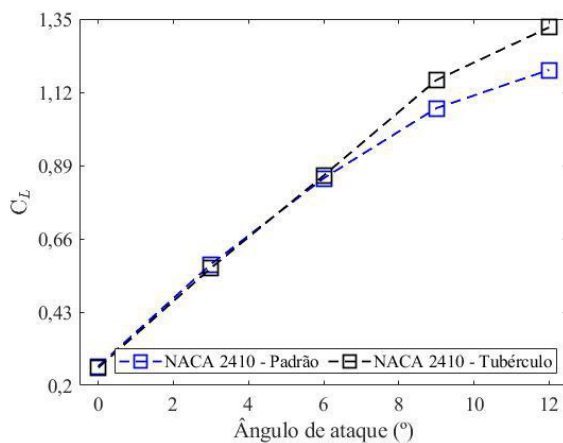


Figura 6. Coeficiente de sustentação (C_L) dos perfis aerodinâmicos com e sem tubérculo.

Este comportamento apresenta concordância com os resultados experimentais de Shi et al. (2017) em que ocorreu o aumento da eficiência na ponta da pá devido a um maior colamento do escoamento, fornecendo um maior torque na região próxima ao estol, assim como no trabalho de Joseph e Sathyabhama (2022) em que foi identificado uma perda de sustentação na região próxima ao estol mais suave em relação ao perfil sem os tubérculos.

Conforme pode ser observado na Figura 7, o coeficiente de arrasto (C_D) obtido para os perfis aerodinâmicos NACA 2410 padrão e com tubérculo são apresentados para diferentes ângulos de ataque ($0^\circ - 12^\circ$). Foi identificado que o aumento (12,30%) do coeficiente de arrasto para os ângulos de ataque de 9°

e 12° , ou seja, principalmente na região próxima ao estol, cujo resultado apresenta concordância com os resultados de Stein e Murray (2005). O comportamento do perfil aerodinâmico com o tubérculo em função do ângulo de ataque é semelhante ao perfil aerodinâmico sem o tubérculo.

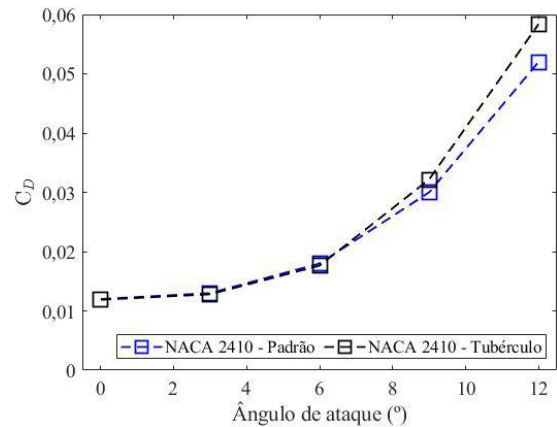


Figura 7. Coeficiente de arrasto (C_D) dos perfis aerodinâmicos com e sem tubérculo.

O comportamento obtido é semelhante ao encontrado por Joseph e Sathyabhama (2022), em que o coeficiente de arrasto com tubérculo é semelhante ao do perfil sem tubérculo. Além disso, esta diferença tende a ser menor para número de Reynolds mais alto.

Além dos coeficientes de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D), deve-se analisar a performance aerodinâmica, em que este parâmetro consiste na relação entre o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque. O perfil aerodinâmico com maior eficiência apresenta maior valor da razão C_L/C_D . Desta forma, assim como foi realizado por Shen et al. (2016), neste trabalho foi analisada a performance aerodinâmica dos dois perfis (com e sem tubérculo).

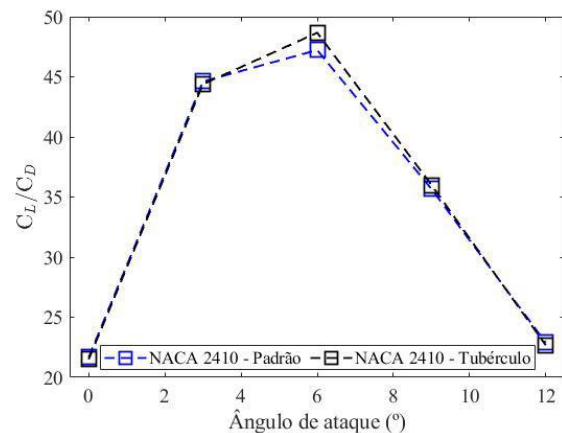


Figura 8. Performance aerodinâmica (C_L/C_D) em função do ângulo de ataque.



Conforme pode ser observado na Figura 8, as performances aerodinâmicas dos perfis aerodinâmicos com e sem tubérculo em função do ângulo de ataque apresentam comportamentos semelhantes. Contudo, para o ângulo de ataque ótimo (6°) foi identificado o maior incremento (3,1%) da performance aerodinâmica, enquanto nos outros ângulos os valores obtidos são semelhantes, ou seja, não afeta de forma significativa. Este resultado indica que o uso da biomimética, no caso de tubérculos, pode propiciar o aumento da performance aerodinâmica. Além disso, uma análise mais robusta da forma do tubérculo utilizando algoritmo genético, por exemplo, pode melhorar ainda mais os ganhos obtidos.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise da aplicabilidade da biomimética no perfil aerodinâmico NACA 2410 através da dinâmica dos fluidos computacional. Foi utilizado um modelo simplificado de tubérculo no perfil aerodinâmico para cinco diferentes ângulos de ataque. A partir dos resultados obtidos, as principais conclusões que podem ser feitas são:

- a) Os tubérculos podem aumentar o coeficiente de sustentação (CL) em até 11,23% em relação ao perfil aerodinâmico padrão (sem tubérculo);
- b) Ocorreu o aumento do coeficiente de arrasto (CD) com os tubérculos, principalmente na região próxima ao estol;
- c) A performance aerodinâmica do perfil aerodinâmico com tubérculo apresentou incremento de até 3,1% em relação ao perfil aerodinâmico padrão (sem o tubérculo);
- d) Não necessariamente o ângulo de ataque com maior coeficiente de sustentação tem a melhor performance aerodinâmica, independentemente se tem ou não a presença de tubérculo;

Portanto, foi identificado que a biomimética apresenta resultados promissores para aplicabilidade em turbinas eólicas e até mesmo outras aplicações que envolvam perfis aerodinâmicos para baixas velocidades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ABNT. ABEEOLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica. Relatório Anual 2021. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/424_ABEEOLICA_REL

TORIO-ANUAL-2021_V3.pdf. Acesso em: 12 fevereiro de 2024.

ANTUNES, A.R.; REISDORFER, L.M.; SCHNEIDER, L.T.P; DEMARCO, G. Desempenho aerodinâmico de perfis modificados com biomimética. Anais do 7mo Congresso Argentino de Ingeniería Aeronáutica, 2023.

CHU, Y.; CHONG, W. A biomimetic wind turbine inspired by *Dryobalanops aromatica* seed: numerical prediction of rigid rotor blade performance with openfoam®. *Computers & Fluids*, Vol. 159, p. 295-315, 2017.

FLUENT, A. User's Guide. Ansys Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., Vol. 15317, p. 724-46, 2013.

HANSEN, K.L.; KELSO, R.M.; DALLY, B.B. Performance Variations of Leading-Edge Tubercles for Distinct Airfoil Profiles. *Aiaa Journal*, Vol. 49, n. 1, p. 185-194, 2011.

IKEDA, T.; TANAKA, H.; YOSHIMURA, R.; NODA, R.; FUJII, T.; LIU, H. A robust biomimetic blade design for micro wind turbines. *Renewable Energy*, Vol. 125, p. 155-165, 2018.

JOSEPH, J.; SATHYABHAMA, A. Leading edge tubercle on wind turbine blade to mitigate problems of stall, hysteresis, and laminar separation bubble. *Energy Conversion and Management*, Vol. 255, p. 115337, 2022.

KE, W.; HASHEM, I.; ZHANG, W.; ZHU, B. Influence of leading-edge tubercles on the aerodynamic performance of a horizontal-axis wind turbine: a numerical study. *Energy*, Vol. 239, p. 122186, 2022.

KOSTAS, K.V.; AMIRALIN, A.; SAGIMBAYEV, S.; MASSALOV, T.; KALEL, Y.; POLITIS, C.G. Parametric model for the reconstruction and representation of hydrofoils and airfoils. *Ocean Engineering*, Vol. 199, p. 107020, 2020.

KUMAR, V.; SAHOO, R.R. Exergy and energy analysis of a wavy fin radiator with variously shaped nanofluids as coolants. *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 48, p. 2174-2192, 2019.

MOUSAVIZADEH, S.M.; ANSARIFAR, G.R.; TALEBI, M. Assessment of the TiO₂/water nanofluid effects on heat transfer characteristics in VVER-1000 nuclear reactor using CFD modeling. *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 47, p. 814-826, 2015.

LIN, Y.; CHIU, P. Influence of leading-edge protuberances of fx63 airfoil for horizontal-axis wind turbine on power performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 38, p. 100675, 2020.



LIU, Y.; HE, X.; YUAN, C.; CAO, P.; BAI, X. Antifouling applications and fabrications of biomimetic micro-structured surfaces: a review. *Journal of Advanced Research*, 2023.

NASCIMENTO, E.O.; RIBEIRO, R.S.; OLIVEIRA, D.; VAZ, J. Wind turbine blades designed to the wind conditions of Ajuruteua beach. *Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering*, 2019.

OUKASSOU, K.; MOUHSINE, S.E.; HAJJAJI, A.E.; KHARBOUCH, B. Comparison of the power, lift and drag coefficients of wind turbine blade from aerodynamics characteristics of Naca0012 and Naca2412. *Procedia Manufacturing*, Vol. 32, p. 983-990, 2019.

PAIVA, R.B.V.; GÓES, J.F.; NASCIMENTO, E.O. Estudo de perfis aerodinâmicos aplicados a aerogeradores em baixa velocidade de vento. *Anais do I Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia*, 2020.

PATANKAR, S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor & Francis, 1980.

RAHNAMAYBAHAMBARY, K.; KAVIAN-NEZHAD, M.R.; KOMRAKOVA, A.; FLECK, B.A. A numerical study of bio-inspired wingtip modifications of modern wind turbines. *Energy*, Vol. 292, p. 130561, 2024.

ROCHA, P.A.C.; ROCHA, H.H.B.; CARNEIRO, F.O.M.; SILVA, M. E.V.; ANDRADE, C.F. A case study on the calibration of the κ - ω SST (shear stress transport) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils. *Energy*, Vol. 97, p. 144-150, 2016.

SHI, W.; ATLAR, M.; NORMAN, R. Detailed flow measurement of the field around tidal turbines with and without biomimetic leading-edge tubercles. *Renewable Energy*, Vol. 111, p. 688-707, 2017.

SHEN, X.; YANG, H.; CHEN, J.; ZHU, X.; DU, Z. Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, Vol. 119, p. 266-278, 2016.

SILVA, P.A.S.F.; TSOUTSANIS, P.; VAZ, J.R.P.; MACIAS, M.M. A comprehensive CFD investigation of tip vortex trajectory in shrouded wind turbines using compressible RANS solver. *Energy*, Vol. 294, p. 130929, 2024.

STEIN, B.; MURRAY, M. M. Stall mechanism analysis of humpback whale flipper models. *Proceedings of Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, Vol. 5, 2005.

WANG, Z.; ZHUANG, M. Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind

turbine at low tip-speed-ratios. *Applied Energy*, Vol. 208, p. 1184-1197, 2017.

WILCOX, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc., La Canada Flintridge. 1993.

YOSSRI, W.; AYED, S.B.; ABDELKEFI, A. Evaluation of the efficiency of bioinspired blade designs for low-speed small-scale wind turbines with the presence of inflow turbulence effects. *Energy*, Vol. 273, p. 127210, 2023. Autor(es) da revista.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
REITORIA
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

1. Identificação do autor

Nome completo: MAYARA SANTANA VIEIRA

CPF: 958.791.882-72

RG: 5820318 PC/PA Telefone: (93) 99140-9647

E-mail: maysantana.stm@gmail.com

Seu e-mail pode ser disponibilizado na página de rosto?

() Sim (x) Não

2. Identificação da obra

() Monografia () TCC () Dissertação () Tese (x) Artigo científico () Outros:

Título da obra: ANÁLISE NUMÉRICA DA APLICABILIDADE DA BIOMIMÉTICA EM UM PERFIL AERODINÂMICO PARA A APLICAÇÃO EM TURBINAS EÓLICAS.

Programa/Curso de pós-graduação: _____

Data da conclusão: _____

Agência de fomento (quando houver): _____

Orientador: JOSECLEY FIALHO GOES

E-mail: josecley.goes@ufopa.edu.br

Co-orientador: ERICK OLIVEIRA DO NASCIMENTO

Examinadores: _____

3. Informação de disponibilização do documento:

O documento está sujeito a patentes? () Sim (X) Não

Restrição para publicação: () Total () Parcial (X) Sem restrição

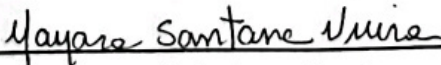
Justificativa de restrição total*: _____

4. Termo de autorização

Autorizo a Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) a incluir o documento de minha autoria, acima identificado, em acesso aberto, no Portal da instituição, no Repositório Institucional da Ufopa, bem como em outros sistemas de disseminação da informação e do conhecimento, permitindo a utilização, direta ou indireta, e a sua reprodução integral ou parcial, desde que citado o autor original, nos termos do artigo 29 da Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, e da lei 12.527 de novembro de 2011, que trata da Lei de Acesso à Informação. Essa autorização é uma licença não exclusiva, concedida à Ufopa a título gratuito, por prazo indeterminado, válida para a obra em seu formato original.

Declaro possuir a titularidade dos direitos autorais sobre a obra e assumo total responsabilidade civil e penal quanto ao conteúdo, citações, referências e outros elementos que fazem parte da obra. Estou ciente de que todos os que de alguma forma colaboram com a elaboração das partes ou da obra como um todo tiveram seus nomes devidamente citados e/ou referenciados, e que não há nenhum impedimento, restrição ou limitação para a plena validade, vigência e eficácia da autorização concedida.

Santarém, 25 /09/2024.


Assinatura do autor

5. Tramitação no curso

Secretaria / Coordenação de curso



Documento assinado digitalmente
NELSON DE SOUZA AMORIM
Data: 26/09/2024 14:18:40-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Recebido em ___/___/___.

Responsável: _____

Siape/Carimbo