



**XXVIII CREEM**

Congresso Nacional de Estudante  
de Engenharia Mecânica

Santa Maria - RS



XXVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica  
09 a 13 de maio de 2022, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

## **EMPREGO DA BIOMIMÉTICA PARA A MODIFICAÇÃO DO PERFIL DAS PÁS DE UMA TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE**

**Luana Taís Puhl Schneider, luana.schneider@acad.ufsm.br<sup>1</sup>**

**Pedro Henrique Melo Bottlender, pedrobottlender97@outlook.com<sup>2</sup>**

**César Gabriel dos Santos, cesar.g.santos@ufsm.br<sup>1</sup>**

**Carlos Eduardo de Souza, carlos.souza@ufsm.br<sup>3</sup>**

**Giuliano Demarco, giuliano.demarco@ufsm.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Programa de pós graduação em Engenharia Mecânica - PGMEC, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal de Santa Maria - UFSM-CS, 96503-205, Cachoeira do Sul, RS, Brasil.

**Resumo.** O uso de fontes de energias renováveis no mundo tem se tornado cada vez mais comum. No Brasil, o aproveitamento das fontes renováveis tem se destacado nas últimas décadas, visto que a crescente necessidade da preservação do meio ambiente tem se tornado cada vez mais necessária. Dessa maneira, avaliar a influência da modificação do perfil aerodinâmico de pás em turbinas eólicas com base nos princípios da biomimética, é uma maneira de tentar otimizar a eficiência na produção de energia. Neste contexto, o objetivo do trabalho é avaliar a influência no desempenho de um aerogerador a partir da modificação dos perfis das suas pás com base no perfil das nadadeiras de uma baleia jubarte. Para isso, dois perfis são desenvolvidos em um software de modelagem 3D, sendo um correspondente à seção de uma pá eólica convencional e o outro correspondente à seção de uma pá eólica com a inclusão de tubérculos na borda de ataque. Em seguida, é conduzida uma simulação aerodinâmica utilizando o software Ansys e os resultados indicam um aumento no coeficiente de sustentação do perfil modificado com tubérculos, em comparação ao perfil convencional.

**Palavras chave:** Biomimética. SG6043. Turbina eólica. Baleia Jubarte. Aerodinâmica

**Abstract.** The use of renewable energy sources around the world has become increasingly common. In Brazil, the use of renewable sources has stood out in recent decades, since the growing need for environmental preservation has become increasingly necessary. Thus, evaluating the influence of modifying the aerodynamic profile of wind turbine blades, based on the principles of biomimetics, is one way to try to optimize the efficiency of energy production. In this context, the objective of this work is to evaluate the influence on the performance of a wind turbine by modifying the profiles of its blades based on the fin profile of a humpback whale. To this end, two profiles are developed in 3D modeling software, one corresponding to the section of a conventional wind blade and the other corresponding to the section of a wind blade with the inclusion of tubercles on the leading edge. Then, an aerodynamic simulation is conducted using Ansys software and the results indicate an increase in the lift coefficient of the modified profile with tubercles compared to the conventional profile.

**Keywords:** Biomimetics. SG6043. Wind turbine. Humpback Whale. Aerodynamic

### **1. INTRODUÇÃO**

A busca pela substituição das fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis por fontes renováveis vem aumentando a nível mundial. Nesse sentido, destacam-se os aerogeradores, capazes de converter a energia dos ventos em energia elétrica. No entanto, apesar do elevado desenvolvimento e avanço da tecnologia de aerogeradores, conforme apontado pelo relatório de energias renováveis da SEBRAE Energia para o ano de 2020, ainda persistem desafios para a sua utilização em determinadas localidades. Um destes desafios está relacionado ao emprego de aerogeradores em localidades que apresentam ventos com baixas velocidades médias. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar se a melhora das características aerodinâmicas das pás do aerogerador promove um aumento do desempenho na sua operação, mesmo em condições de ventos com baixas velocidades. Além disso, existem outros fatores que podem vir a apresentar

melhorias a partir de um perfil aerodinâmico otimizado das pás, como o ruído causado durante a operação dos aerogeradores.

Diante disso, este trabalho propõe a modificação do perfil das pás de um aerogerador de pequeno porte, em busca de investigar os benefícios associados à melhoria aerodinâmica das pás, como a redução de ruído, aumento do coeficiente de sustentação e diminuição do coeficiente de arrasto, possibilitando sua operação com ventos de baixas velocidades. Para isso, serão utilizados os princípios de biomimética.

A biomimética é o campo de estudo que busca incorporar princípios da natureza em soluções de engenharia e tecnologia. Isto se justifica pelo fato de que a natureza vem evoluindo por milhares de anos, desenvolvendo mecanismos cada vez mais eficientes e adaptados às condições de vida dos seres vivos através da seleção natural. Assim, a busca por soluções de engenharia inspiradas nos seres vivos que desenvolvem funções semelhantes, ou vivem em meios semelhantes aos do problema a ser solucionado, vem sendo adotada desde a Grécia antiga, segundo PAIVA (2021).

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar a modificação de uma seção do perfil das pás de um aerogerador de pequeno porte, a partir dos princípios da biomimética, utilizando o perfil das nadadeiras de uma baleia jubarte (*Megaptera novaeangliae*). A baleia jubarte apresenta protuberâncias na borda de ataque das suas nadadeiras, que são chamadas de “tubérculos”. Esta característica das nadadeiras possibilita à baleia a realização de manobras e curvas de raio pequeno, apesar de ser um mamífero de grandes dimensões, o que é benéfico para a sua alimentação. Em seguida, pretende-se avaliar a ocorrência de melhorias do desempenho aerodinâmico das pás e consequentes melhorias de eficiência do aerogerador.

## 3. METODOLOGIA

Diversos autores têm investigado a aerodinâmica de perfis bioinspirados em nadadeiras de baleias jubarte, como Miklosovic et al. (2004), Swanson e Isaac (2011) e Kunya et al. (2019). A Figura 1 mostra o perfil das nadadeiras de uma baleia jubarte.



Figura 1. Baleia jubarte e perfil das nadadeiras (New e Ng, 2020)

### 3.1. Modelo de turbina eólica

Uma vez que o objetivo deste trabalho é avaliar a influência no desempenho de um aerogerador a partir da modificação dos perfis das suas pás com base no perfil das nadadeiras de uma baleia jubarte, é necessário tomar como referência o modelo de um aerogerador existente, sem o perfil das pás modificado, a fim de possibilitar a comparação entre o desempenho de ambos os modelos. Para isso, é proposta a utilização de um aerogerador de pequeno porte, com, no máximo, 5kW de potência nominal, uma vez que o emprego deste tipo de aerogeradores traz grandes possibilidades de geração de energia em pequena escala, como a operação em velocidades de vento reduzidas, possibilitando a sua utilização para geração de energia em casas, condomínios e fazendas. Além disso, a avaliação de um modelo de pequenas dimensões possibilita o desenvolvimento de futuros trabalhos envolvendo a construção de protótipos e simulação em túnel de vento.

<b>Especificações</b>	<b>Gerar Extreme</b>
Potência nominal	1200 W
Diâmetro do rotor	2,46 m
Velocidade nominal	13 m/s
Velocidade de partida	2,2 m/s
Tipo de alternador elétrico	Fluxo axial
Gerador elétrico	Síncrono de imã permanente
Tensão de saída	12/24/48 V
Torque de partida	0,3 Nm
Rotação nominal	480 rpm
Temperatura de operação	-10 °C a 50 °C
Tipo de pá	Torcida (10 aerofólios)
Material da pá	Compósito de fibra de vidro
Peso total	39 kg

Tabela 1. Dados do aerogerador (Enersud, 2021)

### 3.2. Modelagem geométrica

Fish e Battle (1995) removeram a nadadeira de um exemplar de baleia jubarte (*Megaptera Novaeangliae*) a fim de analisar a morfologia e investigar os parâmetros relacionados ao desempenho aerodinâmico de suas nadadeiras. Assim, os autores avaliaram a corda ( $c$ ), a espessura máxima ( $T$ ) e a posição do ponto de espessura máxima em relação a borda de ataque ( $X$ ).

Normalmente, a nadadeira da baleia jubarte representa de 25% a 33% do comprimento do seu corpo (Fish e Battle, 1995), e apresenta de 9 a 11 tubérculos. Dentre os tubérculos, se destacam o primeiro e o quarto, pois são mais salientes em comparação aos demais, de modo que sua extensão é de aproximadamente 4% além da borda de ataque da nadadeira. Ainda, segundo os mesmos autores, a seção transversal da nadadeira das baleias jubarte se assemelha ao perfil aerodinâmico NACA 634-021. Apesar disso, para este trabalho foram utilizados os dados da pá eólica desenvolvida por Stefanello (2016), que utiliza o perfil SG6043. Além disso, o perfil desenvolvido apresenta o comprimento da corda constante, resultando em tubérculos de mesmo tamanho, com  $0,04c$  de amplitude, a fim de simplificar a análise, onde  $c$  é a corda do perfil.

Assim, a partir dos dados coletados, foi desenvolvido o perfil modificado que é mostrado na Figura 3 (a), enquanto a Figura 3 (b) apresenta o perfil convencional, sem a presença de tubérculos. Apenas uma parte do perfil da asa foi modelado, pois a análise deste perfil é mais simples do que a avaliação do perfil completo de uma pá de aerogerador.

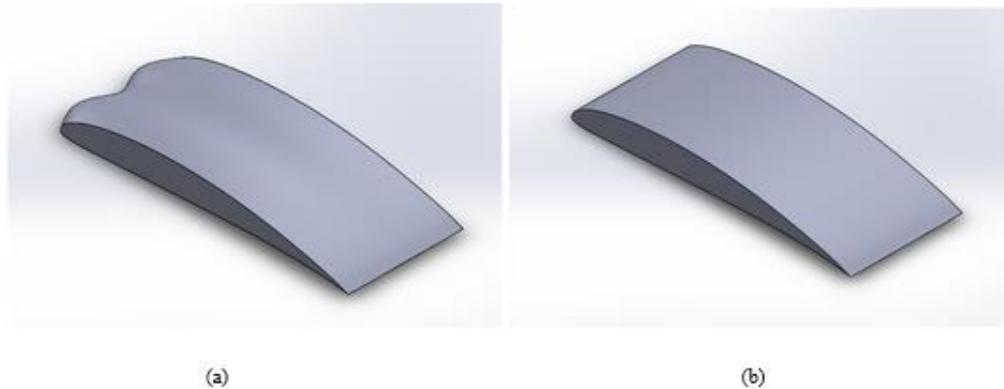


Figura 3. (a) perfil modificado com tubérculos (b) perfil convencional (Autores, 2022)

### 3.3. Características dos aerofólios

A Figura 4 apresenta um aerofólio genérico e suas principais características geométricas, bem como as forças resultantes sobre o perfil, sendo  $V_\infty$  a velocidade do escoamento não perturbado,  $\alpha$  o ângulo de ataque e  $R$  é a força resultante sobre o aerofólio, que pode ser dividida nas forças de sustentação  $S$  e arrasto  $A$  ou força normal  $N$  e axial  $A'$ . Um aerofólio possui uma extremidade dianteira e uma extremidade traseira, caracterizando, respectivamente, o bordo de ataque e o bordo de fuga do mesmo. O segmento de reta que liga o bordo de ataque ao bordo de fuga é denominado de corda  $c$ . Percebe-se que cada aerofólio, ou perfil aerodinâmico, possui um extradorso e o intradorso, o que representa a extremidade superior e a extremidade inferior do perfil. A espessura do aerofólio é a resultante da distância entre o extradorso e o intradorso, sendo também função do arqueamento. O arqueamento é a distância máxima entre a linha de arqueamento e a linha de corda  $c$ . Uma característica importante para análises aerodinâmicas é a definição do ângulo de ataque  $\alpha$ , o qual é o ângulo formado entre a linha de corda e a direção da velocidade não perturbada  $V_\infty$  em questão (Anderson, 2017).

Os coeficientes aerodinâmicos são valores admissionais utilizados para realizar análises dos comportamentos e dos desempenhos de aerofólios. Os coeficientes de sustentação ( $C_L$ ) e arrasto ( $C_D$ ) são importantes para prever a performance dos aerofólios, mesmo em número de Reynolds muito acima do valor crítico. Os valores destes coeficientes variam em função da velocidade do escoamento, do ângulo de ataque, da dimensão do objeto, da densidade e viscosidade do fluido, sendo que, em alguns casos, quando o escoamento é compreensível, os coeficientes também variam de acordo com o número de Mach. O número de Reynolds também influencia diretamente nos coeficientes de arrasto e de sustentação. Perfis aerodinâmicos eficientes possuem grandes coeficientes de sustentação e baixos coeficientes de arrasto.

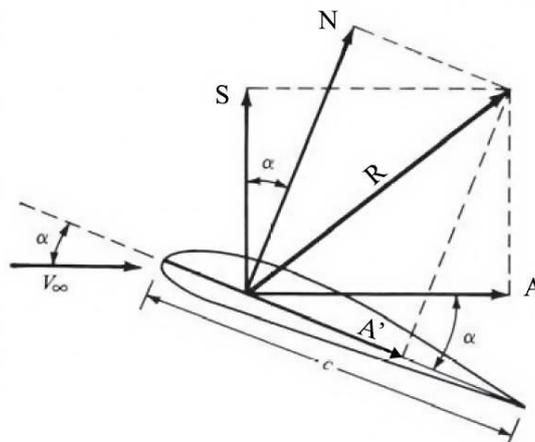


Figura 4. Principais características dos aerofólios (adaptado de Anderson, 2017)

### 3.4. Condições de contorno

De acordo com Paiva (2021), para aerofólios de turbinas eólicas de pequeno porte, a velocidade resultante na seção transversal da pá, varia de 45 a 90 m/s, e o número de Reynolds varia de  $0,5 \times 10^5$  a  $10 \times 10^5$ . Aerofólios de pequeno porte normalmente são desenvolvidos para serem usados em pequenos ângulos de ataque, pois nesta condição a sustentação é elevada e o arrasto é baixo. Miklosovic et al. (2004) realizou um estudo bastante semelhante ao que está sendo proposto neste trabalho, variando Re de  $5,05 \times 10^5$  a  $5,20 \times 10^5$ .

Com estas análises pretende-se avaliar o impacto dos tubérculos no funcionamento das pás através da comparação entre modelo de pá sem os tubérculos e o modelo com tubérculos. Isso será feito por meio de simulação computacional.

Segundo Goetten et al. (2019) para simulações aerodinâmicas que buscam representar o corpo em condições de atmosfera livre, o campo de fluido em torno do aerofólio deve ser grande o suficiente para representar esta situação. Além disso, um domínio muito pequeno pode causar influência nos resultados. Assim, é recomendado que o domínio seja de 50 vezes o comprimento de referência do corpo para simulações em 3D, e a superfície de saída do escoamento deve ser posicionada a mais de 10 vezes o comprimento de referência do corpo. Em simulações de aerofólios é considerada uma prática comum tomar o comprimento da corda como referência para determinar as dimensões do domínio. As práticas recomendadas não serão adotadas neste trabalho em função dos recursos computacionais insuficientes para a realização de simulações com tamanhas dimensões. Assim, optou-se por utilizar um domínio simplificado.

Quando trata-se de uma simulação numérica, o processo de traduzir uma geometria e modelos matemáticos em uma linguagem computacional, ou seja, em números, denomina-se processo de discretização. Para a discretização espacial, necessita-se gerar uma malha ou grade, constituída de um número finito de pontos distribuídos pelas superfícies da geometria desejada, esses números finitos são divididos em células por todo o domínio em que os valores numéricos das variáveis precisam ser determinados. As células podem possuir geometria de quadrilátero, triangular, hexaédrica, entre outras. As malhas ou grades formadas pelas células podem ser malhas estruturadas ou desestruturadas, dinâmicas ou estáticas. É aplicada a lei da conservação nos pontos discretos definidos acima, para que seja possível o cálculo dos fluxos, esses pontos são conhecidos como nós.

A Figura 5 mostra o domínio criado para a realização da simulação, enquanto a Figura 6 mostra detalhes da malha gerada para a avaliação de um dos perfis. Tanto o domínio quanto a malha foram criados com os mesmos parâmetros para ambos os perfis, a fim de manter as condições de simulação constantes. A malha foi gerada com tamanho dos elementos de 1,2 mm e tamanho máximo de 200 mm, possibilitando a criação de uma malha mais refinada e com maior quantidade de nós em volta da geometria do perfil da pá, enquanto nas extremidades do domínio há menor quantidade de nós. Isso permite o cálculo dos resultados para uma maior quantidade de pontos nos arredores do perfil, produzindo um resultado com maior precisão na região de maior interesse. Por outro lado, é possível evitar gastos computacionais desnecessários com o cálculo dos resultados referentes às extremidades do domínio, pois são regiões de menor interesse, que demandam resultados menos precisos em comparação àqueles obtidos em torno do perfil. Além disso, foram utilizadas as ferramentas *sizing*, para a divisão das arestas do domínio, e *inflation*, com 12 camadas em torno das arestas do perfil.

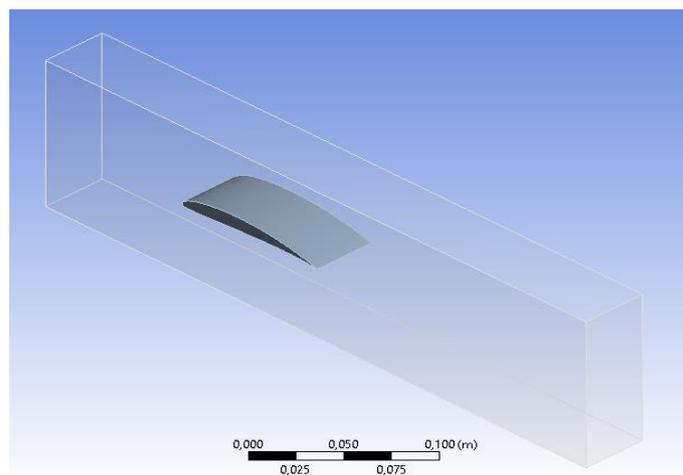


Figura 5. Domínio para simulação em Ansys (Autores, 2022)

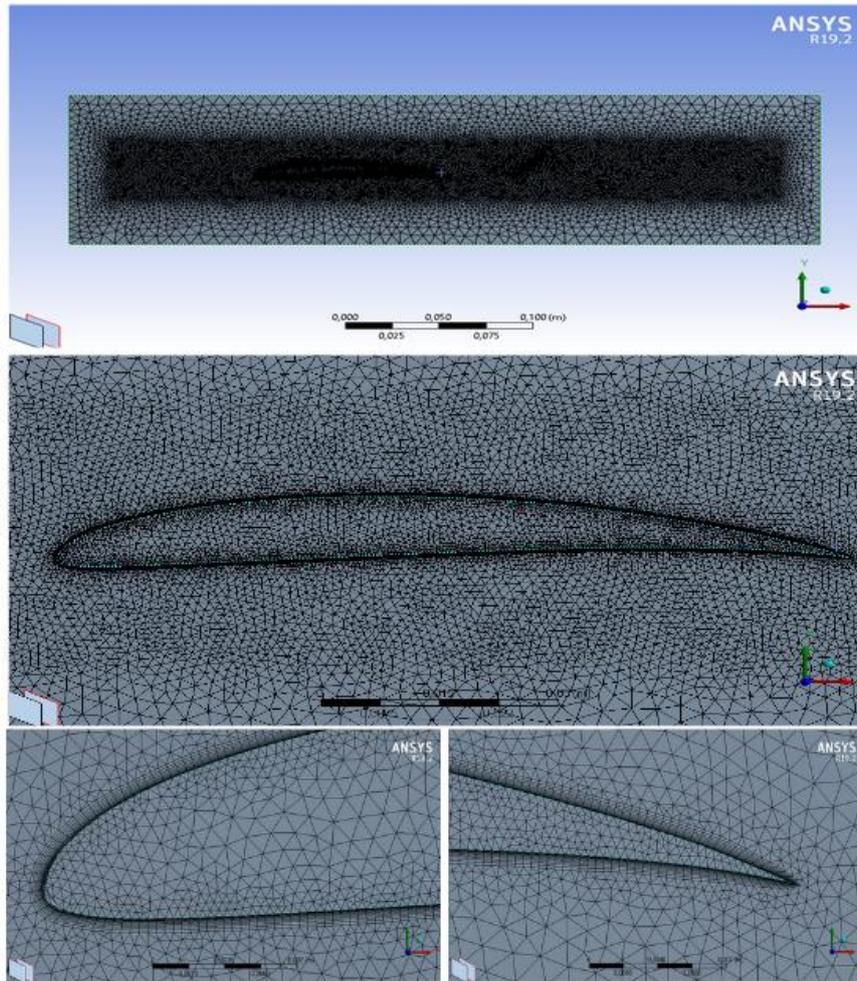


Figura 6. Detalhes da malha de simulação (Autores, 2022)

#### 4. RESULTADOS

Neste trabalho foi utilizada uma velocidade de escoamento de 75,55 m/s e os ângulos de ataque de  $0^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $-10^\circ$ . Dessa forma será possível avaliar parâmetros como a eficiência do modelo para utilização em localidades com baixas velocidades de vento a partir da obtenção dos coeficientes de sustentação e arrasto dos perfis, uma vez que a força de sustentação é diretamente proporcional ao coeficiente de sustentação. Assim será possível avaliar o aumento da eficiência aerodinâmica das pás e potencial aumento da eficiência da turbina.

A simulação é realizada e os resultados são mostrados na Figura 7, onde a curva em vermelho une os resultados obtidos para o coeficiente de sustentação  $C_L$  do perfil com tubérculos nos ângulos de  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , enquanto a curva em azul une os resultados para  $C_L$  do perfil sem tubérculos nos mesmos ângulos. Já a curva em amarelo foi obtida a partir dos dados do aerofólio, fornecidos pela ferramenta Airfoil Tools (2022), para  $Re = 500000$ , valor selecionado de acordo com os valores sugeridos por Miklosovic et al. (2004) e Paiva (2021), e condizente com a velocidade de 75,55 m/s, que se encontra entre 45 m/s e 90 m/s.

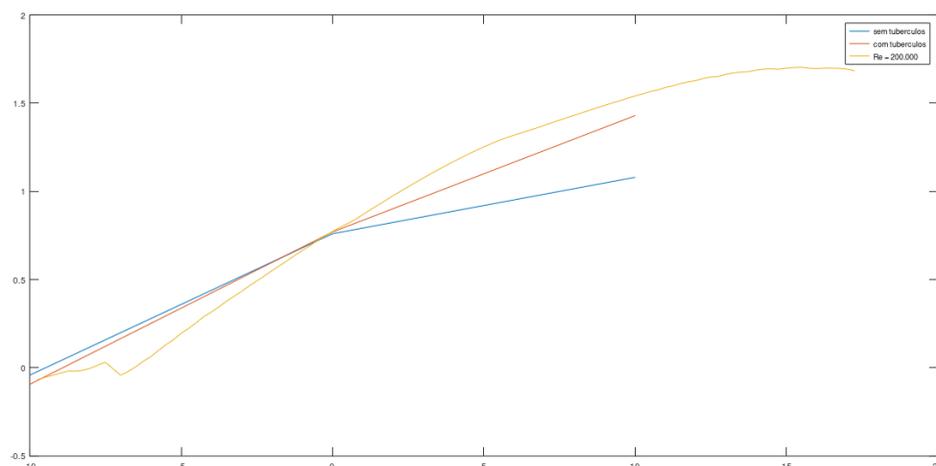


Figura 7. Resultados de CL para os perfis com e sem tubérculos (Autores, 2022)

Percebe-se que existe discrepância entre os valores obtidos para os perfis modelados, em comparação aos valores de referência da curva  $CL \times \alpha$  do aerofólio. Os motivos desta diferença devem ser investigados e as correções implementadas. Assim, será possível realizada a validação da malha através da comparação dos resultados obtidos para os coeficientes CL e CD com aqueles que são fornecidos para o perfil SG6043, na plataforma digital Airfoil Tools (2022), para determinados números de Reynolds, nos ângulos de ataque de  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $10^\circ$ .

Os valores obtidos para CL do perfil com tubérculos para os ângulos de  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , respectivamente, foram de -0,094, 0,77 e 1,43, enquanto os valores obtidos para o perfil sem tubérculos foram de -0,0416, 0,76 e 1,08, respectivamente. Assim, apesar destas discrepâncias, percebe-se que os valores de sustentação obtidos em simulação para o perfil com tubérculos tendem a superar os do perfil sem tubérculos, o que é promissor do ponto de vista aerodinâmico, pois demonstra o potencial de operação do aerogerador em menores velocidades de escoamento, conforme os objetivos propostos neste trabalho.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a melhora das características aerodinâmicas das pás de um aerogerador a partir da modificação do perfil das pás utilizando os conceitos de biomimética. Para isso, foi utilizado como inspiração o perfil das nadadeiras de uma baleia jubarte, que apresentam protuberâncias na sua borda de ataque. Assim, foi realizada a simulação dos perfis de pá eólica em ambiente computacional e foram avaliados os coeficientes aerodinâmicos.

A partir dos resultados obtidos para os coeficientes CL e CD, é possível avaliar a influência dos tubérculos no desempenho aerodinâmico do perfil, uma vez que maiores coeficientes de sustentação estão associados a perfis mais eficientes. Percebe-se que a modificação apresenta potencial de melhoria da eficiência de um aerogerador eólico, viabilizando a sua utilização em localidades com baixas velocidades médias de ventos.

## 5. REFERÊNCIAS

- AIRFOIL TOOLS. SG6043 (sg6043-il), 2022. Disponível em: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=sg6043-il>>. Acesso em: 06 de jan. 2022.
- ANDERSON, J., 2017. Fundamentals of Aerodynamics. McGraw Hill Education, New York, 6th edition.
- FISH, F. E., BATTLE, J. M., Hydrodynamic Design of the Humpback Whale Flipper. *Journal of Morphology*, 225:51-60, 1995.
- KUNYA B. I. et al., Performance study of Whale-Inspired Wind Turbine Blade at Low Wind Speed Using Numerical Method. *CFD Letters*, vol.11, p.11-25, 2019.
- MIKLOSOVIC et al., Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale Megaptera novaeangliae flippers. *Fisics of Fluids*, vol 16, n.5, 2004.
- NEW, D. T. H., Ng, B. F., Flow Control Through Bio-inspired Leading-Edge Tubercles, Springer, Suécia, 2020.
- PAIVA, L. F., Experimental Analysis of Biomimetic Blades for Small Wind Turbines, 2021, Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Aeronáutica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2021.
- SEBRAE Energia. Relatório energias renováveis, 2020. Disponível em:<<https://sebraeenergia.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Relatorio-Cenario-de-Energia-Renovaveis.pdf>>. Acesso em: 06 de jan. 2022.
- STEFANELLO, A. Z., Uma Metodologia para p Projeto Estrutural de Pás de Aerogerador de Pequeno Porte, 2016,

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2016.  
SWANSON T., ISAAC K. M., Biologically Inspired Wing Leading Edge for Enhanced Wind Turbine and Aircraft Performance, In: 6th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, Honolulu, Hawaii, 2011.

TIBOLA, G. Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência. 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

Turbina Eólica Gerar Extreme. Enersud, 2021. Disponível em: <<https://www.enersud.com.br/produtos/turbina-eolica-gerar-extreme/>>. Acesso em: 29 de nov. 2021.

## **6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.