

ANDERSON CATAPAN
HEAD ORGANIZER

**INNOVATION AND PRECISION:
NEW HORIZONS IN EXACT SCIENCES
AND THEIR INTERFACES**

**EDITORIA RGSA
CURITIBA
2025**



Anderson Catapan
Head Organizer



**Innovation and precision: new
horizons in exact sciences and
their interfaces**

EDITORA
GSA

**Editora RGSA
2025**

Copyright©

Editora GSA

Copyright do Texto© 2025

O autor

Copyright da Edição© 2025

Editora GSA

Diagramação

Editora

Edição de Arte

Editora

Revisão

O autor

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos a autora, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Prof. Eliana Andréa Severo, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Brazil

Prof. Isak Kruglianskas, Universidade de São Paulo - FEA/USP, São Paulo, Brazil

Prof. Jacques Demajorovic, Centro Universitário FEI, São Paulo, Brazil

Prof. José Antonio Puppim de Oliveira, Fundação Getulio Vargas (FGV EAESP e FGV EBAPE), Brazil

Prof. José Carlos Barbieri, Fundação Getulio Vargas - EAESP/FGV, São Paulo, Brazil

Prof. José Célio Silveira Andrade, Universidade Federal da Bahia - UFBA, Salvador, Brazil

Prof. Lilian Soares Outtes Wanderley, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Brazil

Prof. Luis Felipe Nascimento, Universidade Federal do Rio Grande - UFRGS, Rio Grande do Sul, Brazil

Prof. Maria Tereza Saraiva de Souza, Centro Universitário FEI, São Paulo, Brazil

EDITORA
GSA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Innovation and precision: new horizons in exact sciences and their interfaces / Anderson Catapan
Curitiba: Editora GSA, 2025.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui: Bibliografia

ISBN: 978-65-6153-000-2

DOI: 10.24857/edgsa.978-65-6153-000-2

1. Ciências Exatas. 2. Inovação.
I. Catapan, Anderson. II. Título.



EDITORA
GSA

2025

APRESENTAÇÃO

“Innovation and Precision: New Horizons in Exact Sciences and Their Interfaces” nasce como um convite para explorar o território vibrante onde rigor matemático, criatividade investigativa e novas tecnologias se encontram. Em um tempo em que as fronteiras do conhecimento parecem se mover mais rápido do que conseguimos mapear, esta obra propõe uma pausa reflexiva — um espaço para observar, analisar e imaginar os caminhos que se desenham no presente e se projetam para o futuro.

Aqui, a inovação não é apenas ferramenta: é linguagem. A precisão não é apenas método: é bússola. E as ciências exatas, em diálogo com suas múltiplas interfaces — sejam elas tecnológicas, ambientais, computacionais ou experimentais — tornam-se palco de descobertas que redefinem possibilidades.

Esta apresentação abraça a diversidade e a amplitude da área, reconhecendo que cada artigo, independentemente do tema específico, contribuirá para ampliar a visão coletiva sobre os desafios e oportunidades emergentes.

Este livro se dirige a quem vive e respira ciência: professores que iluminam caminhos, estudantes que desbravam novos mundos e profissionais que transformam teoria em prática. Que estas páginas ofereçam inspiração, profundidade e, acima de tudo, abertura — para pensar o novo, questionar o estabelecido e construir horizontes cada vez mais ousados.



EDITORA
GSA

2025

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	7
ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA AERODINÂMICA EM PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO DIÂMETRO: NACA 4412 VS. CLARK Y	
Valdir Tesche Signoretti	
Alexandre Augusto Simões Filho	
Ricardo Luiz Perez Teixeira	
Rogério Fernandes Brito	
Paulo Mohallem Guimarães	
José Carlos de Lacerda	
Lindomar Matias Gonçalves	
DOI: 10.24857/edgsa.978-65-6153-000-2_1	



CAPÍTULO 1

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA
AERODINÂMICA EM PÁS DE AEROGERADORES DE
PEQUENO DIÂMETRO: NACA 4412 VS. CLARK Y

Valdir Tesche Signoretti

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

E-mail: valdirsignoretti@unifei.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-3675-9068>

Alexandre Augusto Simões Filho

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

E-mail: alexandresimoesf@unifei.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-0752-1237>

Ricardo Luiz Perez Teixeira

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

E-mail: ricardo.luiz@unifei.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2641-4036>

Rogério Fernandes Brito

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

E-mail: rogbrito@unifei.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6833-7801>

Paulo Mohallem Guimarães

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

E-mail: pauloguimaraes@unifei.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2919-7666>

José Carlos de Lacerda

Universidade Federal de Itajubá

Itabira, Minas Gerais, Brasil

E-mail: jlacerda@unifei.edu.br

Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-7753-1713>

Lindomar Matias Gonçalves

Universidade Federal de Itajubá

Itabira, Minas Gerais, Brasil

E-mail: lindomar@unifei.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9377-4395>

ABSTRACT: Objective: This study aims to compare the efficiency of the Naca 4412 and Clark Y airfoil profiles for small diameter wind turbines using

Solidworks® modeling, 3D printing, wind tunnel testing, and computational simulation. The hypothesis posits that the Naca 4412 will be more efficient. Theoretical Framework: Wind turbines convert the kinetic energy of wind into electrical energy, with the rotor being responsible for converting kinetic energy into mechanical energy, which is subsequently converted into electrical energy by the generator. Studies highlight the importance of optimizing the aerodynamics of the blades to maximize efficiency. Method: The Naca 4412 and Clark Y profiles were modeled in Solidworks® and 3D printed using high-quality ABS. The blades were tested in Armfield C15-10 and Edibon EEEC wind tunnels, measuring lift and drag forces at different angles of attack (30° to 70°) and varying wind speeds to achieve different Reynolds numbers. Results and Discussion: The Naca 4412 profile exhibited higher lift and drag compared to the Clark Y. At angles of 50° and 60°, both profiles showed greater efficiency, with the Naca 4412 achieving higher maximum angular velocity (357.93 RPM at 50°, 510.91 RPM at 60°). The performance difference can be attributed to the twist of the Naca 4412 and turbulence effects at low speeds. Research Implications: The results provide insights for the development of more efficient wind turbines, particularly in urban contexts where small wind turbines are used. Originality/Value: This study contributes by experimentally comparing two widely used airfoil profiles, offering valuable data for the optimization of small wind turbine blades.

KEYWORDS: airfoil profiles, clark Y, rfficiency, naca 4412, wind tunnel, wind turbines

RESUMO: Objetivo: O objetivo deste estudo é comparar a eficiência dos perfis aerodinâmicos Naca 4412 e Clark Y para aerogeradores de pequeno diâmetro, utilizando modelagem em Solidworks®, impressão 3D, testes em túneis de vento e simulação computacional, com a hipótese de que o Naca 4412 seja mais eficiente. Referencial Teórico: As turbinas eólicas convertem a energia cinética do vento em energia elétrica, sendo o rotor responsável pela conversão da energia cinética em energia mecânica, posteriormente convertida em energia elétrica pelo gerador. Estudos destacam a importância da otimização aerodinâmica das pás para maximizar a eficiência. Método: Foram modelados perfis Naca 4412 e Clark Y no Solidworks® e impressos em 3D com ABS de alta qualidade. As pás foram testadas em túneis de vento Armfield C15-10 e Edibon EEEC, medindo forças de sustentação e arrasto em diferentes ângulos de ataque (30° a 70°), variando a velocidade do vento para obter números de Reynolds distintos. Resultados e Discussão: O perfil Naca 4412 apresentou maior sustentação e arrasto em comparação ao Clark Y. Em ângulos de 50° e 60°, ambos os perfis mostraram maior eficiência, com o Naca 4412 destacando-se em velocidade angular máxima (357,93 RPM a 50°, 510,91 RPM a 60°). A diferença de desempenho pode ser explicada pela torção do Naca 4412 e efeitos de turbulência em baixas velocidades. Implicações da Pesquisa: Os resultados fornecem insights para o desenvolvimento de aerogeradores mais eficientes, especialmente em contextos urbanos onde pequenos aerogeradores são utilizados. Originalidade/Valor: estudo contribui ao comparar experimentalmente dois perfis aerodinâmicos amplamente utilizados, oferecendo dados valiosos para a otimização de pás de aerogeradores de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: aerogeradores, clark Y, eficiência, naca 4412, perfis aerodinâmicos, túnel de vento.

1. INTRODUÇÃO

Um parque eólico é uma instalação que abriga vários aerogeradores interligados em rede para produzir energia elétrica (Akanto et al., 2023). A energia gerada é transportada para subestações elétricas por meio de linhas de transmissão e, em seguida, distribuída para residências e empresas (Braunbehrens, Vad, & Bottasso, 2023). Estudos econômicos avaliam a viabilidade financeira do projeto, incluindo custos de investimento, operação e manutenção, bem como previsões de produção de energia (Hadi, Oudah, & Al-Baldawi, 2020). Os parques eólicos são uma fonte importante de energia renovável e podem contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis (Bald, 2022; Hamed & Alshare, 2022).

Um dos principais impactos ambientais negativos da energia eólica é o impacto visual das turbinas eólicas (Nazir et al., 2020; Hamed & Alshare, 2022). Outro impacto ambiental negativo da energia eólica é o ruído (Msigwa, Ighalo, & Yap, 2022; Nazir et al., 2020). Atualmente, a energia eólica é uma das fontes de energia renovável que mais cresce no mundo, cerca de 30% ao ano, sendo responsável por aproximadamente 5% da produção global de energia elétrica (Dehghani-Sanij et al., 2022; Singh et al., 2022). A capacidade instalada de energia eólica em todo o mundo atingiu 743 GW no final de 2020, segundo dados do Global Wind Energy Council (Liu & Zeng, 2022; Liu, Sun, & Wang, 2023).

O potencial de produção de energia eólica no Brasil é estimado em cerca de 500 GW, mais que o dobro da capacidade total instalada atualmente no país (De Jong et al., 2019). Apesar do grande potencial de produção de energia eólica no Brasil, ainda existem desafios a serem superados para o pleno desenvolvimento desta fonte de energia (Shafiullah et al., 2013; Da Ponte, Calili, & Souza, 2021). Um dos principais desafios é a necessidade de investir em infraestruturas de transmissão de energia para permitir a integração dos parques eólicos no sistema elétrico nacional (Góes et al., 2021; Dranka & Ferreira, 2020).

Esta pesquisa comparou a eficiência dos perfis aerodinâmicos Naca 4412 e Clark Y para aerogeradores de pequeno diâmetro, utilizando modelagem em Solidworks®, impressão 3D, testes em túneis de vento e simulação computacional. A hipótese é de que o Naca 4412 seja mais eficiente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As turbinas eólicas são equipamentos que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica (Gantha, Barik, & Nayak, 2021). O rotor consiste em pás movidas pelo vento, convertendo a energia cinética do vento em energia mecânica (Chaudhuri et al., 2022). O gerador converte energia mecânica em energia elétrica, enquanto o sistema de controle garante o funcionamento otimizado da turbina eólica em diferentes condições de vento (Peng, Liu, & Jiang, 2021). As pás do rotor são projetadas para capturar o máximo de energia cinética do vento (Moghadassian & Sharma, 2020; Chaudhuri et al., 2022).

Antes de chegar ao gerador, o movimento gerado pelas pás é transmitido para um sistema de transmissão por engrenagens (Roga et al., 2022; Peng, Liu, & Jiang, 2021). Esse sistema de transmissão, junto com o sistema de controle, trabalha para obter a máxima eficiência de geração de energia do sistema. A velocidade baixa do rotor não geraria muita energia, pois o gerador não consegue captar a energia quando as pás giram em baixa velocidade (Cai et al., 2024; Desalegn, Gebeyehu, & Tamrat, 2022). Por isso, a caixa de redução, aliada ao sistema de controle, aumenta a velocidade do eixo do gerador e a eficiência de captação mecânica da energia no gerador, permitindo captar a energia mecânica do movimento das pás com maior eficiência, dependendo da variabilidade dos fatores que influenciam o movimento das pás.

As turbinas eólicas podem ser divididas em classes de acordo com sua velocidade de referência e velocidade média (Pinto, 2012). Conforme mostrado na Tabela 1, as categorias de velocidade do vento são definidas com base em parâmetros como V_{REF} , a velocidade média anual; V_M , a máxima velocidade esperada em um período de 10 minutos; V_{RAJ50} , a máxima velocidade em um período de 50 anos; e I , a intensidade de turbulência para ventos de 15 m/s. As categorias A e B são atribuídas para diferentes condições de turbulência, sendo A para valores mais altos e B para valores mais baixos, caracterizando o projeto independentemente da velocidade do vento das classes mencionadas. A representação de A como desvio padrão da velocidade longitudinal do vento indica a turbulência associada.

Tabela 1

As quatro classes de aerogeradores, de acordo com a IEC (International Electrotechnical Commission).

CLASSE DA TURBINA EÓLICA	I	II	III	IV	S
VREF (M/S)	50	42,5	37,5	30	VALORES ESPECIFICADOS PELO PROJETISTA
VM (M/S)	10	8,5	7,5	6,0	
VRAJ50= WREF	70	59,5	52,5	42	
VRAJ1 = 1.05VRAJ50	52,5	44,6	39,4	31,50	
A I15(%)	18	18	18	18	
a	2	2	2	2	
B I15 (%)	16	16	16	16	
a	3	3	3	3	

Fonte: Adaptado de Pinto, M. O. (2012). Fundamentos de Energia Eólica (1ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.

A escolha das equações e parâmetros do sistema de controle depende das características da turbina eólica e das condições locais do vento (Yang et al., 2021; Deng et al., 2021). Para implementar esses métodos de controle, sistemas de controle eletrônico e atuadores são usados para ajustar as pás das turbinas eólicas. Os sistemas de controle eletrônico utilizam sensores para medir a velocidade do vento, a velocidade do rotor e outras variáveis relevantes. Com base nessas medições, o sistema de controle ajusta as pás para manter a velocidade desejada do rotor e maximizar a eficiência da turbina eólica. O controle de velocidade, controle de passo e controle de inclinação são os principais métodos de controle utilizados em turbinas eólicas para maximizar sua eficiência e garantir a estabilidade da rede elétrica (Nash, Nouri, & Vassel-Be-Hagh, 2021; Raouf et al., 2023).

Com o aumento da demanda por energia limpa, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para melhorar a eficiência e a capacidade de geração de energia das turbinas eólicas (Roga et al., 2022; Bošnjaković et al., 2022). Uma dessas tecnologias é a turbina eólica flutuante, capaz de produzir energia em águas profundas onde turbinas eólicas fixas não podem ser instaladas. Essas turbinas eólicas são fixadas em plataformas flutuantes ancoradas no fundo do oceano. Além disso, os pesquisadores têm trabalhado em designs de pás mais aerodinâmicos para melhorar a eficiência das turbinas eólicas (Krishnan, Al-Obaidi, & Hao, 2023).

3. METODOLOGIA

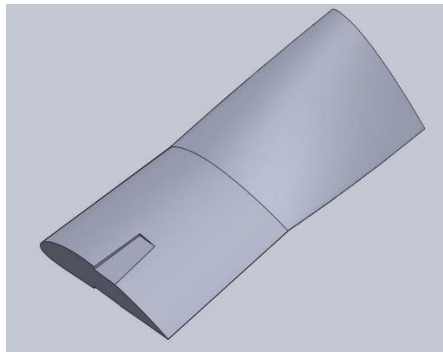
Na seleção do perfil aerodinâmico para um aerogerador de pequeno diâmetro de eixo horizontal, é fundamental considerar as peculiaridades de cada perfil. Os perfis mais adequados para essa aplicação são o Naca 4412 e o ClarkY, devido às suas distintas propriedades aerodinâmicas (Tokul & Kurt, 2023; Mohamed, Ravindran, & Rajendran, 2021).

O perfil Naca 4412 destaca-se pela estabilidade em diferentes ângulos de ataque, aumentando a eficiência do aerogerador em variadas condições de vento (Kapdi, Dahiya, & Naranje, 2016). Em contrapartida, o perfil ClarkY, embora menos comum em aerogeradores de pequeno diâmetro, sobressai-se pela curvatura acentuada na parte inferior, o que proporciona maior sustentação em velocidades de vento mais baixas (Çetin et al., 2005). No entanto, a suavidade da curvatura na parte superior do perfil ClarkY pode resultar em perda de sustentação em alta velocidade de vento, sendo mais apropriado para aerogeradores de baixa potência em diâmetros maiores.

A modelagem desses perfis foi realizada no software de engenharia Solidworks®, conforme demonstrado nas Figuras 1 a 4. As representações destacam a modelagem das pás com detalhes das vistas superior e lateral, tanto para o perfil Naca 4412 quanto para o perfil ClarkY. Na Figura 1, é apresentada a modelagem da pá do perfil Naca 4412 vista superior, detalhando sua geometria aerodinâmica. Na Figura 2, a mesma modelagem é exibida, agora com a inclusão dos eixos para melhor visualização e referência. Na Figura 3, observa-se a representação da modelagem lateral da pá utilizando o perfil Naca 4412, destacando aspectos específicos da aerodinâmica da pá. Na Figura 4, é retratada a modelagem da pá com o perfil ClarkY, evidenciando suas particularidades aerodinâmicas distintas.

Figura 1

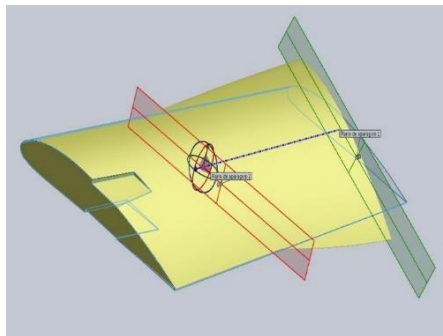
Modelagem da pá no software do perfil Naca 4412 vista superior.



Fonte: Os autores

Figura 2

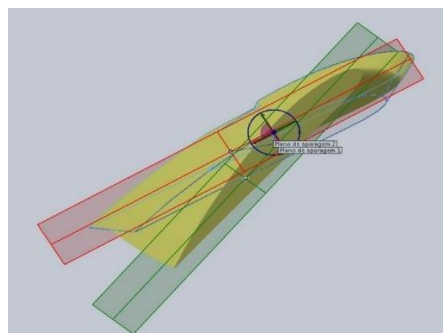
Modelagem da pá no software do perfil Naca 4412 vista superior com eixos.



Fonte: Os autores

Figura 3

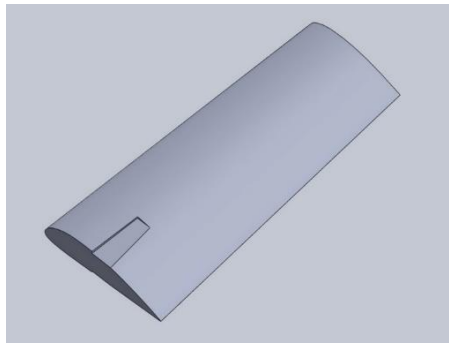
Modelagem da pá no software do perfil Naca 4412 vista lateral.



Fonte: Os autores

Figura 4

Modelagem da pá no software do perfil ClarkY.



Fonte: Os autores

A impressão 3D de diferentes perfis de pás aerodinâmicas, Naca 4412 e ClarkY, foi realizada para testes em túneis de vento com comprimentos de 152 mm e 167 mm. Para a impressão 3D, foram utilizados materiais como o ABS de alta qualidade e resolução para garantir a precisão dos perfis das pás. O resultado de uma das pás está apresentado na Figura 5.

Figura 5

Pás projetadas e impressas em impressora 3D



Fonte: Os autores

Figura 6

Pás fabricadas na impressora 3D sendo usadas no túnel de vento. Vista geral do túnel



Fonte: Os autores

Figura 7

Pás fabricadas na impressora 3D sendo usadas no túnel de vento. Vista das pás



Fonte: Os autores

Inicialmente, foram criados modelos tridimensionais dos perfis de pás aerodinâmicas utilizando softwares de modelagem 3D. Esses modelos foram ajustados para atender às especificações desejadas, como dimensões, ângulos e curvaturas, e posteriormente exportados para um formato de arquivo adequado para a impressão 3D. Após a impressão (Figura 6 e Figura 7), os perfis das pás foram cuidadosamente inspecionados para garantir a qualidade e integridade dos modelos. Em seguida, as pás foram montadas em um suporte e levadas ao túnel de vento.

Para a coleta dos dados de força de arrasto, foi utilizado o túnel de vento modelo Armfield C15-10 (Figura 8), enquanto para a coleta dos dados de

velocidade angular, foi utilizado o túnel de vento modelo Edibon EEEEC, ambos localizados no laboratório de ventilação e refrigeração da UNIFEI/Itabira.

Os resultados dos testes foram utilizados para avaliar a eficiência aerodinâmica dos diferentes perfis. Os dados obtidos foram comparados e analisados para determinar qual perfil de pá apresentou melhor desempenho em cada uma das condições testadas. Esses resultados podem ser utilizados para desenvolver novos projetos de pás aerodinâmicas mais eficientes e sustentáveis. A medição das forças de sustentação e arrasto foi realizada em um túnel de vento modelo Armfield C15-10, conforme apresentado na Figura 8, para os perfis aerodinâmicos Naca 4412 e ClarkY, com o objetivo de avaliar o desempenho desses perfis.

Figura 8

Túnel de vento modelo Armfield C15-10



Fonte: Os autores

A metodologia adotada consistiu em fixar cada pá na bancada de teste do túnel de vento e variar a velocidade do vento para obter diferentes valores de número de Reynolds, um parâmetro adimensional da velocidade do fluido em relação às dimensões da pá. Em seguida, foram realizadas medições das forças de sustentação e arrasto para cada perfil aerodinâmico.

Para a medição da força de sustentação, foi utilizado um sensor de carga que mede a força vertical exercida sobre a pá pelo vento. Já a medição da força de arrasto foi realizada com um dinamômetro, que mede a força horizontal

exercida sobre a pá pelo vento. Essas medições foram feitas para cada velocidade de vento e número de Reynolds.

Com os dados obtidos das medições, foram construídos gráficos no software Origin® para avaliar a relação entre as forças de sustentação e arrasto em função da velocidade do vento e do número de Reynolds. Os resultados mostraram que o perfil aerodinâmico Naca 4412 apresentou maior sustentação em relação ao perfil ClarkY, mas também maior resistência de arrasto. Por fim, a medição das forças de sustentação e arrasto no túnel de vento Armfield C15-10 para os perfis aerodinâmicos Naca 4412 e ClarkY mostrou-se eficiente para avaliar o desempenho desses perfis. A coleta de dados em um túnel de vento modelo Edibon EEEC, apresentado nas Figuras 9 e 10, é uma metodologia utilizada para avaliar o comportamento aerodinâmico de diferentes modelos de pás em condições controladas. Para realizar essa coleta de forma eficiente, é necessário seguir um conjunto de etapas.

Figura 9

Túnel de vento modelo Edibon EEEC. Vista lateral



Fonte: Os autores

Figura 10

Túnel de vento modelo Edibon EEEC. Vista frontal



Fonte: Os autores

Primeiramente, selecionam-se os modelos de pás que serão avaliados. No caso em questão, foram escolhidos os perfis Naca 4412 e ClarkY, amplamente utilizados na indústria de aerogeradores e representativos das características aerodinâmicas de pás industriais. Em seguida, define-se a faixa de ângulos de ataque que serão testados. Foram avaliados ângulos de 30 graus a 70 graus, em incrementos de 10 graus. O ângulo de ataque é a medida do ângulo entre a pá e a direção do vento, e sua variação permite avaliar o desempenho aerodinâmico da pá em diferentes condições de operação.

Para a coleta de dados, utilizam-se equipamentos específicos, como um túnel de vento e um sistema de medição de rotação. O túnel de vento cria um fluxo de ar controlado e consistente sobre a pá, enquanto o sistema de medição registra as velocidades da pá em diferentes ângulos de ataque.

Para garantir a precisão dos resultados, cada ângulo de ataque foi testado quatro vezes para cada perfil de pá. Isso permite calcular a média e o desvio padrão das medições, reduzindo a incerteza dos resultados. Ao final da coleta de dados, os resultados são analisados e o desempenho aerodinâmico dos diferentes perfis de pá em diversos ângulos de ataque é comparado. Essa análise pode ser utilizada para otimizar o projeto de pás de aerogeradores, melhorando sua eficiência e reduzindo os custos de produção e manutenção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a seleção dos perfis, a impressão 3D e a metodologia seguida para a obtenção dos resultados, foram obtidos os seguintes dados dos parâmetros aerodinâmicos dos perfis ClarkY e Naca 4412. A Tabela 2 apresenta o tempo máximo em que os perfis atingiram a velocidade angular máxima, enquanto a Tabela 3 apresenta a velocidade máxima que os perfis alcançaram com 100% de potência do túnel de vento.

Tabela 2

Tempo de resposta até atingir a velocidade angular máxima para cada ângulo em 100% de potência do túnel de vento para o perfil Naca 4412

Ângulo (Graus)	ClarkY	Naca 4412
40°	162 segundos	134 segundos
50°	162 segundos	135 segundos
60°	162 segundos	136 segundos

Fonte: Os autores

Tabela 3

Tempo de resposta até atingir a velocidade angular máxima para cada ângulo em 100% de potência do túnel de vento para o perfil ClarkY

ÂNGULO (GRAUS)	CLARKY	NACA 4412
40°	211,26 RPM	251,04 RPM
50°	301,70 RPM	357,93 RPM
60°	425,59 RPM	510,91 RPM

Fonte: Os autores

A análise da Tabela 2 e da Tabela 3 permite concluir experimentalmente que os perfis aerodinâmicos mais eficientes estão entre os ângulos de 50° e 60°. Nessas condições, as pás, com a mesma velocidade do túnel de vento, alcançam uma RPM (rotações por minuto) mais alta, aumentando a eficiência de produção de energia sem custos adicionais de fabricação ou processo. O experimento atingiu em grande parte o objetivo de identificar um perfil aerodinâmico mais eficiente para aerogeradores de pequeno porte. Verificou-se que o perfil Naca 4412 é o mais adequado para este tipo de aplicação, como em geração de energia em centros urbanos, pois apresentou melhores respostas às velocidades do túnel de vento em relação ao perfil ClarkY.

A diferença entre os tempos de velocidade dos perfis Naca e ClarkY, apresentados na Tabela 2, pode ser explicada por efeitos físicos, como a camada limite no escoamento da pá. O perfil Naca 4412 possui uma torção que, a cada ângulo de ataque, adianta a ponta do perfil em 20°. Isso, somado ao efeito de turbulência em baixas velocidades para ângulos de ataque muito altos, resulta em um pequeno aumento de velocidade. A cada ângulo medido, o ângulo da ponta do perfil fica mais adiantado, causando um descolamento que reduz a eficiência do perfil em baixas velocidades.

Na Tabela 4, são apresentados os valores da força de sustentação dos perfis Naca 4412 e ClarkY em diferentes ângulos de ataque, com 40% da potência do túnel de vento.

Tabela 4

Força de sustentação (Lift) para velocidades de 8,0 m/s respectivo a 40% de potência do túnel de vento

Ângulo (Graus)	ClarkY (Newton)	Naca 4412 (Newton)
15°	0,35	0,38
30°	0,40	0,43

Fonte: Os autores

Os valores da força de sustentação dos perfis Naca 4412 e ClarkY apresentaram uma diferença média de 0,3 N para os ângulos medidos, garantindo um ganho de eficiência entre os perfis. O perfil Naca 4412, por possuir um ângulo de torção, gera uma área no sentido do fluxo que auxilia no aumento da força de sustentação, conforme descrito no trabalho de Choi et al. (2023).

Na Tabela 5, são apresentados os valores da força de arrasto dos perfis Naca 4412 e ClarkY em diferentes ângulos de ataque, com 40% da potência do túnel de vento.

Tabela 5

Força de arrasto (Drag) para velocidades de 8,0 m/s respectivo a 40% de potência do túnel de vento

Ângulo (Graus)	ClarkY (Newton)	Naca 4412 (Newton)
15°	0,07	0,14
30°	0,23	0,31

Fonte: Os autores

Os valores da força de arrasto dos perfis Naca 4412 e ClarkY apresentaram uma diferença média de 0,7 N para os ângulos medidos, sendo essa diferença mais expressiva do que a da força de sustentação. Isso ocorre devido à torção do perfil Naca 4412, que ocupa uma área maior do que o perfil ClarkY. Além disso, a geometria do perfil Naca 4412, com um abaulamento na superfície inferior, também auxilia no aumento da força de sustentação, conforme descrito por Abbott e von Doenhoff (1959).

Na Tabela 6, são apresentados os valores do coeficiente de sustentação (Cl) dos perfis Naca 4412 e ClarkY em diferentes ângulos de ataque, com 40% da potência do túnel de vento.

Tabela 6

Coeficiente de sustentação (Cl) dos perfis em ângulos de ataque de 15° e 30°

ÂNGULO (GRAUS)	CLARKY (CD)	NACA 4412 (CD)
15°	0,09	0,12
30°	0,24	0,27

Fonte: Os autores

A diferença observada na Tabela 6 entre os valores dos coeficientes de sustentação (Cl) das pás confirma que, além da torção do perfil Naca 4412, suas características aerodinâmicas contribuíram para o ganho de eficiência da pá. Em ângulo de ataque de 15°, houve um aumento percentual de 30% do Cl em relação ao perfil Naca 4412, e em ângulo de ataque de 30°, um aumento de 11% também em relação ao perfil Naca 4412. A diminuição observada no percentual entre os perfis é provavelmente devida ao deslocamento do centro de pressão do escoamento durante a medição, que pode interferir no torque gerado no perfil.

Na Tabela 7, são apresentados os valores do coeficiente de arrasto (Cd) dos perfis Naca 4412 e ClarkY em diferentes ângulos de ataque, com 40% da potência do túnel de vento. Os valores apresentados na Tabela 7 para o coeficiente de arrasto (Cd) do perfil Naca 4412 foram maiores do que os do perfil ClarkY. Esses valores são importantes para a análise dos resultados, pois mostram que, à medida que o ângulo de ataque se altera, o Cd diminui, possibilitando um ganho de eficiência na força resultante. Analisando a diferença entre o aumento dos coeficientes de arrasto entre os perfis Naca 4412 e ClarkY

nos ângulos de ataque de 15° e 30°, observa-se que o perfil Naca 4412 teve um aumento de 225%, enquanto o perfil ClarkY teve um aumento de 266%.

Tabela 7

Coeficiente de arrasto (Cd) dos perfis em ângulos de ataque de 15° e 30°

Ângulo (Graus)	ClarkY (Cd)	Naca 4412 (Cd)
15°	0,09	0,12
30°	0,24	0,27

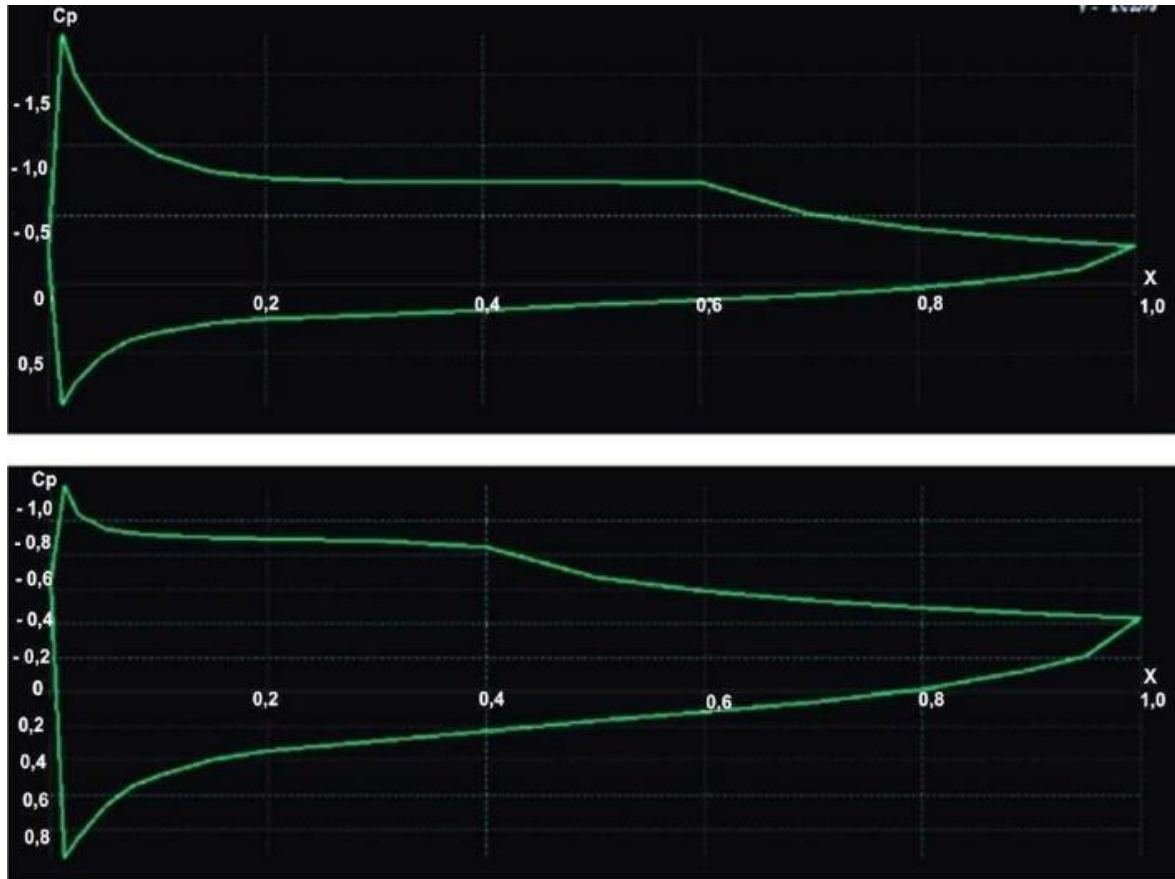
Fonte: Os autores

Provavelmente, essa diferença está relacionada à área da camada limite que se forma nos diferentes ângulos de ataque. No perfil Naca 4412, o aumento da camada limite foi menor devido a um fluxo mais intenso, enquanto no perfil ClarkY um possível aumento da camada limite foi formado devido à redução do fluxo, gerando um aumento de área da camada limite mais expressivo, pois as linhas de corrente estão estritamente correlacionadas com a distribuição de pressão em torno do objeto em análise.

Realizou-se uma simulação no software Xflr5 para obter um parâmetro do comportamento da camada limite dos perfis Naca 4412 e ClarkY. Na Figura 11 é apresentada uma comparação do coeficiente de pressão (Cp) no perfil Naca 4412 vs ângulo de ataque em uma pá de tamanho normalizado.

Figura 11

Coeficiente de pressão (C_p) no perfil Naca 4412 em função do ângulo de ataque em uma pá de tamanho normalizado. O ângulo de ataque na figura superior é de 15° e, na inferior, de 30°

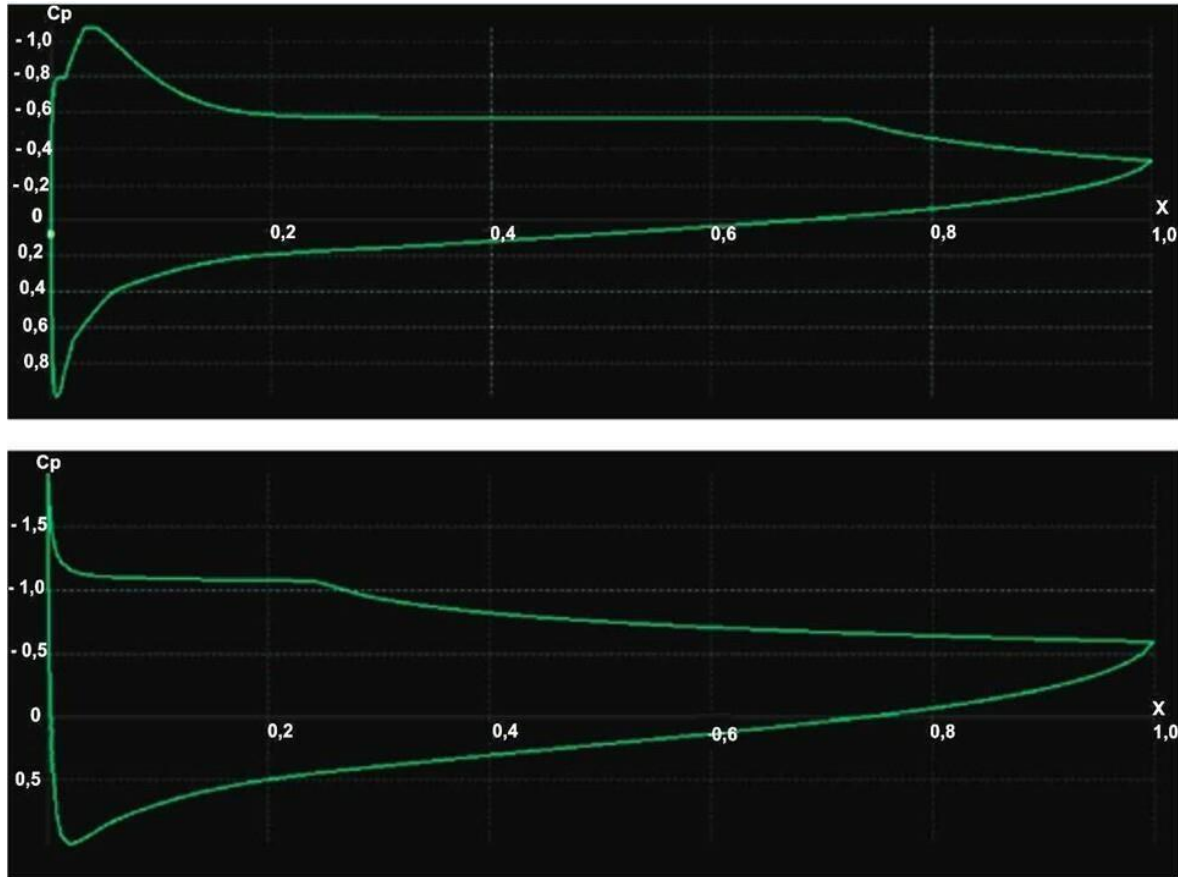


Fonte: Os autores

Na Figura 12, é mostrada uma comparação do coeficiente de pressão pelo ângulo de ataque também em uma pá normalizada do perfil ClarkY. Nesta figura, é possível observar que a camada limite no perfil ClarkY é mais predominante quando o ângulo de ataque é alterado, observando a distribuição de pressão ao redor da pá. Com isso, constata-se que, com o melhor fluxo na base do perfil Naca 4412, escolhido para o trabalho, este perfil destaca-se em eficiência em comparação com o perfil ClarkY.

Figura 12

Coeficiente de pressão (C_p) no perfil ClarkY em função do ângulo de ataque em uma pá de tamanho normaliza-do. O ângulo de ataque na figura superior é de 15° e, na inferior, de 30°



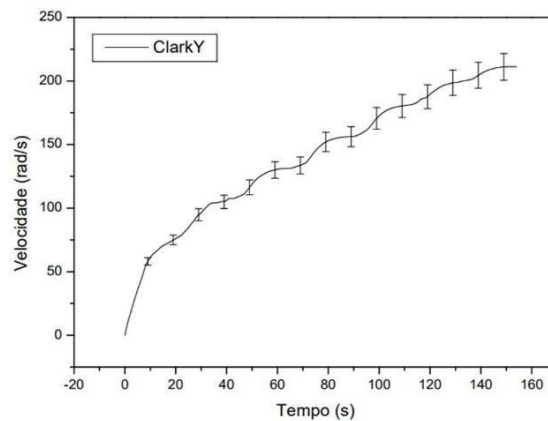
Fonte: Os autores

Os dados foram obtidos sob as seguintes condições: o número de Reynolds encontrado foi de 30.000. Como o número de Reynolds está acima de 2.400, o regime é turbulento. As medições foram realizadas a uma temperatura de 27°C , com densidade do ar igual a $1,17 \text{ kg/m}^3$.

Na Figura 13, são apresentados os valores de velocidade angular em função do tempo para o perfil ClarkY. Observa-se que, com o aumento da velocidade, as dispersões aferidas indicam uma instabilidade do fluido ao percorrer as pás devido ao aumento da velocidade. Isso está de acordo com a teoria de Ludwig Prandtl, conforme Altenbach e Bruhns (2020), que afirma que o aumento da velocidade pode resultar em perda de eficiência em certos pontos da pá, especialmente na ponta, que sofre com a diferença de velocidade tangencial em relação à velocidade do fluido, causando uma perda de eficiência.

Figura 13

Valores de velocidade angular em função do tempo para o perfil ClarkY

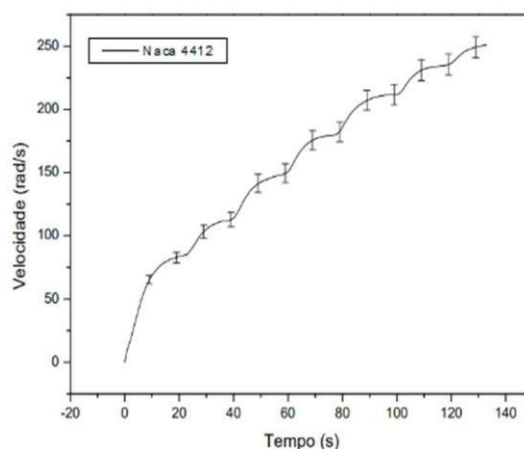


Fonte: Os autores

Na Figura 14, são apresentados os valores de velocidade angular em relação ao tempo para o perfil Naca 4412. Este perfil apresenta menor dispersão, conforme indicado pelo desvio padrão, o que está em concordância com os resultados de velocidade máxima em função do tempo. A explicação provável para esses dados é que o perfil Naca 4412 possui maior estabilidade aerodinâmica em comparação com o perfil ClarkY, permitindo uma melhor absorção de energia para a transformação do movimento de rotação devido ao maior coeficiente de sustentação (C_l) e à torção da pá.

Figura 14

Valores de velocidade angular em relação ao tempo para o perfil Naca 4412



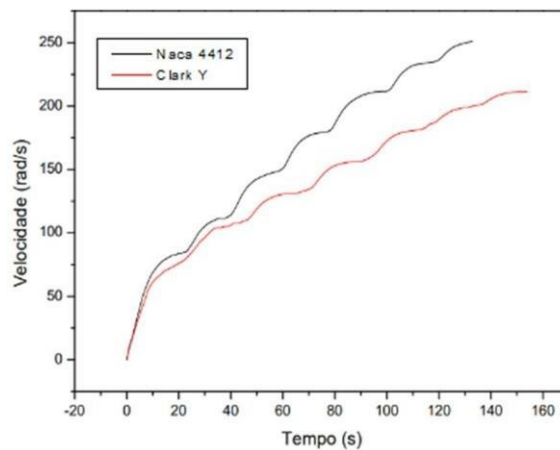
Fonte: Os autores

A Figura 15 apresenta a diferença na medição total de velocidade angular entre os perfis Naca 4412 e ClarkY. O perfil Naca 4412 mostrou um menor

tempo de acomodação para alcançar sua velocidade máxima, uma maior velocidade angular máxima e uma eficiência média 23% superior em comparação com o perfil ClarkY.

Figura 15

Diferença na medição total de velocidade angular entre os perfis Naca 4412 e ClarkY



Fonte: Os autores

De maneira resumida, a simulação realizada no software Xflr5 permitiu uma análise comparativa entre os perfis Naca 4412 e ClarkY em relação ao comportamento da camada limite. O perfil Naca 4412 demonstrou maior eficiência, conforme evidenciado pelo coeficiente de pressão (C_p) em relação ao ângulo de ataque, conforme apresentado na Figura

11. Em contraste, a Figura 12 ilustrou que a camada limite no perfil ClarkY é mais proeminente com a variação do ângulo de ataque, refletindo uma menor eficiência. Os dados foram obtidos em condições de regime turbulento, com número de Reynolds acima de 2.400, temperatura de 27°C e densidade do ar de 1,17 kg/m³. As Figuras 13 e 14 mostram os valores de velocidade angular em relação ao tempo para os perfis ClarkY e Naca 4412, respectivamente, destacando a superioridade na estabilidade aerodinâmica do perfil Naca 4412, que apresentou uma eficiência média 23% superior ao perfil ClarkY, sugerindo sua adequação para aplicações em aerogeradores de pequeno diâmetro.

Os resultados obtidos dos parâmetros aerodinâmicos dos perfis ClarkY e Naca 4412 indicam uma eficiência superior para ângulos de ataque entre 50° e 60°. As pás, operando com a mesma velocidade do túnel de vento nessas

condições, alcançam rotações por minuto (RPM) mais altas, o que aumenta a eficiência na produção de energia sem custos adicionais de fabricação. O perfil Naca 4412 mostrou-se mais adequado para aplicações em aerogeradores de pequeno porte, como em geração de energia urbana, devido às suas melhores respostas às velocidades do túnel de vento em comparação com o perfil ClarkY.

A diferença nos tempos de velocidade dos perfis Naca e ClarkY pode ser explicada por efeitos físicos, como a camada limite no escoamento da pá. O perfil Naca 4412, com sua torção característica, gera uma área no sentido do fluxo que auxilia no aumento da força de sustentação. Isso resulta em uma eficiência média 23% superior em comparação com o perfil ClarkY.

Os valores da força de sustentação e arrasto dos perfis Naca 4412 e ClarkY mostraram diferenças significativas, sendo que o perfil Naca 4412 apresentou maiores valores em ambos os casos. Esses resultados estão alinhados com as características aerodinâmicas desses perfis e contribuem para a compreensão de sua eficiência em diferentes condições de operação.

A análise dos coeficientes de sustentação e arrasto também reforça a superioridade do perfil Naca 4412 em termos de eficiência aerodinâmica. A diferença observada entre os perfis confirma que, além da torção do perfil Naca 4412, suas características aerodinâmicas contribuem significativamente para o ganho de eficiência da pá.

A Figura 11 até a Figura 15 fornecem uma visualização clara dos comportamentos dos perfis em relação aos parâmetros aerodinâmicos estudados, confirmando os resultados analíticos e experimentais obtidos. Em resumo, o perfil Naca 4412 se destaca como a escolha mais eficiente para aplicações em aerogeradores de pequeno porte, especialmente em ambientes urbanos.

5. CONCLUSÃO

Com base nos testes realizados no túnel de vento e na análise dos perfis aerodinâmicos Naca 4412 e ClarkY para aplicação em aerogeradores de eixo horizontal de pequeno diâmetro, conclui-se que ambos os perfis são adequados para essa aplicação específica. A simulação computacional também corroborou

esses resultados, destacando o perfil Naca 4412 como mais eficiente devido ao seu abaulamento na parte inferior da pá, conforme esperado pela literatura.

O perfil Naca 4412 demonstrou um desempenho estável em uma ampla faixa de ângulos de ataque e é recomendado para aerogeradores que operam em velocidades moderadas de vento. Por outro lado, o perfil ClarkY, com sua curvatura mais acentuada na parte inferior, apresenta maior eficiência em baixas velocidades de vento, sendo mais adequado para aerogeradores de baixa potência.

Os dados experimentais indicaram que os perfis mais eficientes estão entre os ângulos de ataque de 30° e 60°, devido ao tempo de resposta para atingir as velocidades máximas. O perfil Naca 4412 também se destacou em termos de velocidade máxima em comparação com o perfil ClarkY, especialmente para aplicações de pequeno porte, como em residências urbanas.

A análise das forças de sustentação e arrasto reforçou a importância da torção do perfil Naca 4412 para o ganho de eficiência. O coeficiente de sustentação e arrasto mostrou uma queda à medida que o ângulo de ataque aumentava, contribuindo para um ganho de eficiência na força resultante.

A estabilidade aerodinâmica do perfil Naca 4412 foi evidenciada pelos resultados, mostrando menor dispersão aferidas pelo desvio padrão em comparação com o perfil ClarkY. Esses resultados são valiosos para o desenvolvimento de aerogeradores mais eficientes e sustentáveis.

Os resultados obtidos na pesquisa são relevantes para o desenvolvimento futuro de novos projetos de pás aerodinâmicas para aerogeradores de pequenos diâmetros, incluindo aplicações residenciais. Sugestões para trabalhos futuros incluem a análise de processos corrosivos em aerogeradores, a utilização do software Xfoil para análise de parâmetros aerodinâmicos, a usinagem dos perfis em diferentes materiais e a análise mais detalhada dos coeficientes de arrasto e sustentação em diferentes condições de vento e velocidade.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se aos grupos de pesquisas da Universidade federal de Itajubá LEFTER100, GPESE e ao Metals Group pelo apoio ao desenvolvimento da

pesquisa, bem como à Universidade Federal de Itajubá por todo o suporte fornecido.

REFERÊNCIAS

- Akanto, J. M., et al. (2023). Dynamic analysis of grid-connected hybrid wind farm. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 14(2), 1230-1237.
- Altenbach, H., & Bruhns, O. T. (2020). Prandtl, Ludwig. In H. Altenbach & A. Öchsner (Eds.), *Encyclopedia of Continuum Mechanics* (pp. 289). Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-55771-6_289
- Bald, J. (2022). Reviewing the ecological impacts of offshore wind farms. *npj Ocean Sustainability*, 1.
- Barooni, M., et al. (2022). Floating offshore wind turbines: Current status and future prospects. *Energies*, 16(1), 2.
- Bošnjaković, M., et al. (2022). Wind turbine technology trends. *Applied Sciences*, 12(17), 8653.
- Braunbehrens, R., Vad, A., & Bottasso, C. L. (2023). The wind farm as a sensor: learning and explaining orographic and plant-induced flow heterogeneities from operational data. *Wind Energy Science*, 8(5), 691-723.
- Cai, W., et al. (2024). Cross-coupling control design of a flexible dual rotor wind turbine with enhanced wind energy capture capacity. *Renewable Energy*, 220, 119629.
- Çetin, N. S., et al. (2005). Assessment of optimum tip speed ratio of wind turbines. *Mathematical and Computational Applications*, 10 (1), 147-154.
- Chaudhuri, A., et al. (2022). Energy conversion strategies for wind energy system: Electrical, mechanical and material aspects. *Materials*, 15(3), 1232.
- Da Ponte, G. P., Calili, R. F., & Souza, R. C. (2021). Energy generation in Brazilian isolated systems: Challenges and proposals for increasing the share of renewables based on a multicriteria analysis. *Energy for Sustainable Development*, 61, 74-88.
- De Jong, P., et al. (2019). Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. *Renewable Energy*, 141, 390-401.
- Dehghani-Sanij, A. R., et al. (2022). Assessment of current developments and future prospects of wind energy in Canada. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101819.
- Deng, X., et al. (2021). Review of energy storage systems for wind power integration. *Applied Energy*, 291, 116862.

- Desalegn, B., Gebeyehu, D., & Tamrat, B. (2022). Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: A review. *Heliyon*, 8(11).
- Dranka, G. G., & Ferreira, P. (2020). Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. *Energy Policy*, 136, 111033.
- Farr, H., et al. (2021). Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities. *Ocean & Coastal Management*, 207, 105611.
- Gantha, B. P., Barik, S. K., & Nayak, B. (2021). Wind turbines in energy conversion system: Types & techniques. In *Renewable Energy and Future Power Systems* (pp. 199-217).
- Góes, M. F. B., et al. (2021). Wind power projects in Brazil: challenges and opportunities increasing co-benefits and implications for climate and energy policies. *Environment, Development and Sustainability*, 23(10), 15341-15367.
- Hadi, F. A., Oudah, S. S., & Al-Baldawi, R. A. (2020). An economic study of a wind energy project using different sources of wind data. *Iraqi Journal of Science*, 322-332.
- Hamed, T. A., & Alshare, A. (2022). Environmental impact of solar and wind energy-a review. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(2), 1- 23.
- Kapdi, R., Dahiya, R., & Naranje, V. (2016). Analysis and optimization of horizontal axis wind turbine blade profile. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5, 19-24.
- Krishnan, A., Al-Obaidi, A. S. M., & Hao, L. C. (2023). A comprehensive review of innovative wind turbine airfoil and blade designs: Toward enhanced efficiency and sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103511.
- Liu, F., Sun, F., & Wang, X. (2023). Impact of turbine technology on wind energy potential and CO₂ emission reduction under different wind resource conditions in China. *Applied Energy*, 348, 121540.
- Liu, Y., & Zeng, Z. (2022). Wind Energy. In *The Palgrave Handbook of Global Sustainability* (pp. 1-17). Cham: Springer International Publishing.
- Moghadassian, B., & Sharma, A. (2020). Designing wind turbine rotor blades to enhance energy capture in turbine arrays. *Renewable Energy*, 148, 651-664.
- Mohamed, W. M. W., Ravindran, N. P., & Rajendran, P. (2021). A CFD simulation on the performance of slotted propeller design for various airfoil configurations. *CFD Letters*, 13 (3), 43-57.
- Msigwa, G., Ighalo, J. O., & Yap, P. S. (2022). Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections

towards sustainability initiatives. *Science of The Total Environment*, 849, 157755.

Nash, R., Nouri, R., & Vassel-Be-Hagh, A. (2021). Wind turbine wake control strategies: A review and concept proposal. *Energy Conversion and Management*, 245, 114581.

Nazir, M. S., et al. (2020). Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13, 85-90.

Peng, X., Liu, Z., & Jiang, D. (2021). A review of multiphase energy conversion in wind power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111172.

Pinto, M. O. (2012). *Fundamentos de Energia Eólica* (1st ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Raouf, A., et al. (2023). Wind energy conversion systems based on a synchronous generator: Comparative review of control methods and performance. *Energies*, 16(5), 2147.

Roga, S., et al. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. Roga, S., et al. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102239.

Roga, S., et al. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review.

Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52, 102239.

Shafiullah, G. M., et al. (2013). Potential challenges of integrating large-scale wind energy into the power grid—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 306-321.

Singh, U., et al. (2022). Wind energy scenario, success and initiatives towards renewable energy in India—A review. *Energies*, 15(6), 2291.

Tokul, A., & Kurt, U. (2023). Comparative performance analysis of NACA 2414 and NACA 6409 airfoils for horizontal axis small wind turbine. *International Journal of Energy Studies*, 8 (4), 879-898.

Yang, K., et al. (2021). A review of ducted wind turbines: A promising technology for wind energy harvesting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110653.

Agência Brasileira ISBN
ISBN: 978-65-6153-000-2