UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JASSON FERNANDEZ GURGEL

ANÁLISE NUMÉRICA DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DE UMA TURBINA EÓLICA COM GERADORES DE VÓRTEX

FORTALEZA
2026

JASSON FERNANDEZ GURGEL

ANÁLISE NUMÉRICA DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DE UMA TURBINA EÓLICA COM GERADORES DE VÓRTEX

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Orientadora: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade

Coorientador: Prof. Dr Francisco Olimpio Moura Carneiro

FORTALEZA

2026

JASSON FERNANDEZ GURGEL

ANÁLISE NUMÉRICA DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DE UMA TURBINA EÓLICA COM GERADORES DE VÓRTEX

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Aprovada em: 17/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr Francisco Olimpio Moura Carneiro (Coorientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. João Batista Furlan Duarte
Universidade de Fortaleza (Unifor)

À Deus, princípio e fim de tudo na minha vida, à Nossa Senhora, por quem mais recebo ajuda perante nosso senhor, à São José, a quem também tenho singela devoção e por cujo exemplo direciono minha vida. Também a minha mãe, a meu pai, a toda a minha família e a todos aqueles que direta ou indiretamente me ajudaram.

AGRADECIMENTOS

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

À Professora Dra. Carla Freitas de Andrade, por me orientar na dissertação de mestrado.

Ao Professor Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro, meu coorientador, que também me ajudou na orientação do mestrado.

Ao Professor Dr. André Valente Bueno, que também me ajudou e cedeu o uso dos computadores do laboratório de hidrogênio e máquinas térmicas para que eu pudesse realizar boa parte das simulações necessárias para essa dissertação.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), por possibilitar uma bolsa de pesquisa para meu mestrado.

Ao Professor Dr. André Valdetaro Gomes Cavalieri por me motivar a aprender e gostar de aerodinâmica teórica e experimental.

Ao Coronel engenheiro Marco Antônio Sala Minucci, por ser minha maior referência profissional e por me fazer escolher um futuro profissional buscando pesquisa e ensaios visando tecnologias e produtos voltados para o desenvolvimento nacional.

Ao Brigadeiro engenheiro Maurício Pazini Brandão, por me motivar a buscar o conhecimento na área aerodinâmica, sobre a qual eu procurei estudar ao longo dos anos.

“Buscai antes o Reino de Deus e a sua justiça e todas essas coisas vos serão dadas por acréscimo.”

(Lucas 12:31)

RESUMO

O Brasil é o sexto maior produtor de energia eólica do mundo, entretanto, usa menos de 3 % da sua capacidade de geração eólica em solo. Nesse contexto, a busca por perfis aerodinâmicos cada vez mais eficientes e a melhoria dos já existentes são formas de potencializar o já abundante potencial eólico do Brasil. Nesta dissertação, o objetivo principal é prever, por uso do software ANSYS Fluent, o aumento da potência fornecida por um perfil aerodinâmico de uma pá eólica pela adição de geradores de vórtex ao longo de 10% da raiz da pá, que mitigarão os efeitos do descolamento da camada limite e, consequentemente, melhorarão a eficiência do gerador. Os objetivos específicos são aplicar a metodologia a um perfil NACA de 4 dígitos sem VG e, aplicando uma metodologia de VG já validada, simular novamente e comparar os ganhos relativos de potência. As condições de simulação foram estudadas com volume de controle proporcional ao diâmetro da turbina, a 30 graus Celsius, com velocidade de operação do vento de 10 m/s e por uso do modelo de turbulência GEKO. Concluiu-se que há aumento da potência fornecida pela turbina eólica em condição de operação devido ao uso de geradores de vórtex, cujo valor depende da velocidade de rotação relativa a velocidade do vento usada para projetar a pá. Foram projetadas pás com a razão entre a velocidade de rotação da ponta da pá em relação a velocidade do vento (TSR) de 5, 6, 7 e 8. A de TSR 7 foi a de maior ganho relativo de potência prevista por simulação CFD com gerador de vórtex, chegando a um ganho relativo previsto com gerador de vórtex de .156%.

Palavras-chave: Aerodinâmica; CFD; turbina eólica; gerador de vórtex.

ABSTRACT

Brazil is the sixth-highest producer of wind energy in the world but uses less than 3% of its onshore wind generation capacity. In this context, the search for aerodynamic profiles that are more efficient and improve the existing ones is a way to increase Brazil's already abundant wind potential. In this dissertation, the main objective is to predict, through the use of ANSYS Fluent software, the increase in power provided by an aerodynamic profile of a wind blade by adding vortex generators through 10% of the blade's root, which will mitigate the effects of detachment of the boundary layer and, consequently, will improve the generator efficiency. The specific objectives are to apply the methodology through a NACA 4-digit wind turbine model without VG and, with the application of a validated VG methodology, simulate and compare the increase in relative power delivered. The simulation conditions were studied with a control volume proportional to the turbine diameter at 30 degrees Celsius, with a wind speed of 10 m/s and by using the GEKO turbulence model. It was concluded that there is an increase in the power supplied by the wind turbine under operating conditions due to the use of vortex generators, whose value depends on the used TSR. It were projected wind turbines for TSR of 5, 6, 7 and 8, the one with TSR 7 had the highest relative power gain generated by CFD simulation with a vortex generator, reaching a relative power coefficient gain of 1.156%.

Keywords: Aerodynamics; CFD; wind turbine; vortex generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custo por kwh por fonte de energia em escala global em 2010 e 2022 16
Figura 2 – Histórico do custo por kwh da energia eólica em escala global de 1983 a 2022 17
Figura 3 – Produção cientifica anual desde 1992 21
Figura 4 – Distribuição dos artigos ao longo dos anos pelos 3 países com mais publicação 22
Figura 5 – Produção das 4 principais instituições ao Longo do Tempo 27
Figura 6 – Produção dos países ao longo do tempo 28
Figura 7 – Rede de colaboração entre os autores 29
Figura 8 – Algumas redes de colaboração entre instituições 30
Figura 9 – Componentes de forças atuantes em uma seção de pá eólica 32
Figura 10 – Perfis NACA 6712, 6714 e 6716 33
Figura 11 – Gráficos sustentações e características aerodinâmicas para os perfis bidimensionais NACA 6712, 6714 e 6716 em Reynolds um milhão e Mach 0 35
Figura 12 – Gráficos sustentações e características aerodinâmicas para os perfis bidimensionais NACA 6712, 6714 e 6716 em Reynolds 13 milhões e Mach 0.176 36
Figura 13 – Gráficos extrapolação dos coeficientes de sustentação, arrasto e momento por Viterna para NACA 6712, 6714 e 6716 para Reynolds um milhão e Mach 0 . 37
Figura 14 – Gráficos extrapolação dos coeficientes de sustentação, arrasto e momento por Viterna para NACA 6712, 6714 e 6716 para Reynolds de 13 milhões e Mach 0.176 37
Figura 15 – Cp NACAs 6712, 6714 e 6716 em função do TSR 40
Figura 16 – Modelo tridimensional da pá eólica NACA 6712 de eixo horizontal no software Fusion 360 para estudantes 41
Figura 17 – Modelo tridimensional da pá eólica NACA 6714 de eixo horizontal no software Fusion 360 para estudantes 42
Figura 18 – Modelo tridimensional da pá eólica NACA 6716 de eixo horizontal no software Fusion 360 para estudantes 42
Figura 19 – Volume de controle rotativo que contém a pá NACA 6712 da turbina de eixo horiontal feito no software Fusion 360 versão estudantil 45
Figura 20 – Volume de controle fixo que contém o volume de controle rotativo feito no software Fusion 360 versão estudantil 45

Figura 21 – Tratamento do y plus perto da parede para modelo turbulentos RANS no ANSYS Fluent 47
Figura 22 – Malha do volume de controle externo 48
Figura 23 – Malha das superfícies dos volumes de controle 49
Figura 24 – Visão em corte da malha no comprimento da pá 50
Figura 25 – Visão em corte da malha na seção do perfil da pá 50
Figura 26 – Visão em corte com discretização para camada limite 51
Figura 27 – Modelo do gerador de vórtex adotado 54
Figura 28 – Convergência dos resíduos em função das iterações 57
Figura 29 – Convergência do torque em função das iterações 58
Figura 30 – Velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR5 sem VG (A) e com VG (B) 59
Figura 31 – Velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR6 sem VG 60
Figura 32 – Velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR7 sem VG 61
Figura 33 – Perfil de velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR8 sem VG 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – As principais informações sobre os dados gerados pelo Bibliometrix. 21
Tabela 2 – Ordem dos periódicos mais citados 23
Tabela 3 – Os 11 periódicos mais relevantes 24
Tabela 4 – Os 2 autores em termos de números de documentos e número de citações . 24
Tabela 5 – Os 40 documentos mais citados com a quantidade de citações 25
Tabela 6 – As 11 instituições com mais publicações relacionadas 26
Tabela 7 – Quantidade de documentos por país 27
Tabela 8 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras 28
Tabela 9 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras parte 2 28
Tabela 10 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras parte 3 29
Tabela 11 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras parte 4 29
Tabela 12 – Variações do perfil NACA 6712 escolhidos 33
Tabela 13 – Número de Reynolds e Mach finais para as perfis aerodinâmicos simulados 36
Tabela 14 – Comprimento da corda por posição relativa nas pás NACA 6712-6714-6716 39
Tabela 15 – Ângulo de torção por posição relativa nas pás NACA 6712-6714-6716 . . . 39
Tabela 16 – Coeficientes de potência para TSR 6 para os perfis NACA simulados 40
Tabela 17 – Afilamento nas pás NACA 6712 com TSR 5,6,7 e 8 44
Tabela 18 – Torção por posição relativa nas pás NACA 6712 com TSR 5,6,7 e 8 44
Tabela 19 – Dados do volume de controle rotativo das pás NACA 6712 44
Tabela 20 – Dados do volume de controle fixo que contém o volume de controle rotativo 46
Tabela 21 – Principais condições superficiais de malha 47
Tabela 22 – Condições de discretização da camada limite no NACA 6712 48
Tabela 23 – Condições da malha volumétrica NACA6712 48
Tabela 24 – Condições preliminares de simulação 51
Tabela 25 – Condições do fluido usado na simulação 51
Tabela 26 – Condições do volume de controle rotativo das turbinas de eixo horizontal por TSR 5,6,7 e 8 52
Tabela 27 – Condições de velocidade e turbulência 52
Tabela 28 – Condições de discretização e acoplamento pressão-velocidade 53
Tabela 29 – Resíduos alvo para as condições de convergência 53
Tabela 30 – Descrição de pesquisa do VG 53

Tabela 31 – Parâmetros geométricos do VG 53
Tabela 32 – Posições ótimas dos geradores de vórtex por TSR 54
Tabela 33 – Posições escolhidas para posicionamento dos geradores de vórtex para validação de posicionamento 55
Tabela 34 – Torque e número de elementos dos perfis NACA6712 56
Tabela 35 – Valores de y+ médio nas simulações 58
Tabela 36 – Ganho percentual de torque e valores de Cp para NACA6712 63

LISTA DE SÍMBOLOS

C_a	Coeficiente de arrasto
C_p	Coeficiente de potência
C_s	Coeficiente de sustentação
μ	Posição relativa radial a partir da extremidade da pá
ν	Posição relativa na corda a partir do bordo de fuga
Y^+	Distância adimensional da parede

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEM	Blade Element Momentum
CFD	Computational Fluid Dynamics
LES	Large Edge Simulation
RANS	Reynolds Average Navier Stokes
SST	Shear Stress Transport
TSR	Tip Speed Ratio
VG	Vortex Generator

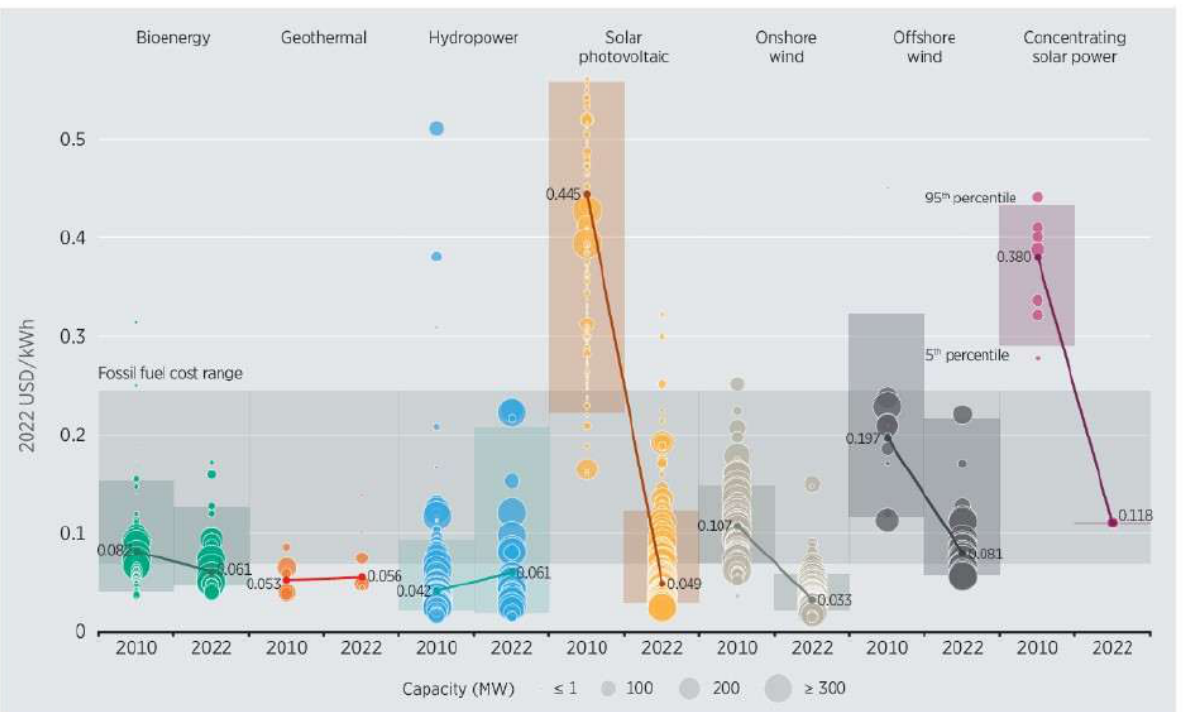
SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	16
1.1	**Turbina eólica para geração elétrica**	16
1.2	**Mecânica dos fluidos computacional**	17
2	**OBJETIVO**	19
2.1	**Projeto de uma pá eólica de eixo horizontal utilizando perfil NACA de 4 dígitos**	19
2.2	**Projeto de geradores de vórtex para a nova pá**	19
2.3	**Análise comparativa do desempenho da nova pá com geradores de vórtex**	19
3	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	20
3.1	**Contexto Nacional**	27
4	**METODOLOGIA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**	32
4.1	**Turbina Eólica**	32
4.1.1	***Turbina Eólica de eixo horizontal***	32
4.2	**Análise por CFD das pás**	41
4.2.1	***Volume de controle***	43
4.2.2	***Construção de malha***	45
4.2.3	***Condições de simulação***	49
4.2.4	***Geradores de Vórtex***	53
5	**RESULTADOS**	56
6	**CONCLUSÕES**	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o sexto maior produtor de energia eólica e o terceiro maior mercado para instalação de energia eólica onshore no mundo (Assireu *et al.*, 2024) (Ferreira *et al.*, 2024). A energia eólica é, em escala global, dentro das fontes de energias disponíveis, incluindo as não renováveis, a com menor custo por kWh fornecido, (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023), como exposto na Figura 1 a seguir:

Figura 1 – Custo por kwh por fonte de energia em escala global em 2010 e 2022



Fonte: (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023).

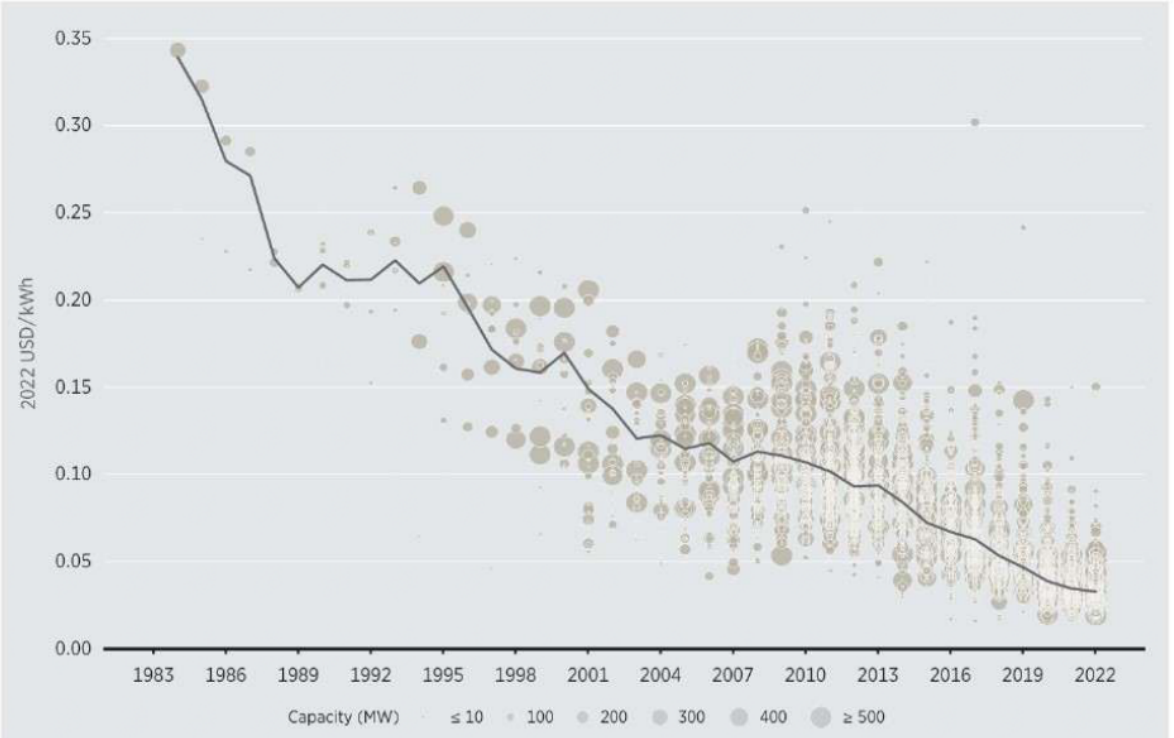
Em conjunto com o fato de que o custo por kWh fornecido de geração eólica vem diminuindo desde seu início no Brasil em 1992 (Araújo e Freitas, 2008), tal fonte de energia tem o potencial de ser, no Brasil, a principal, possibilitando menores custos de eletricidade para os consumidores e, consequentemente, produtos e serviços mais competitivos.

1.1 Turbina eólica para geração elétrica

A primeira turbina eólica para geração elétrica foi concebida em 1888 por Charles F. Brunch, o qual fez um catavento adaptado para a geração elétrica (Spera, 1977).

A partir do final do século 19 e do início do século 20, iniciando na Europa em 1891,

Figura 2 – Histórico do custo por kwh da energia eólica em escala global de 1983 a 2022



Fonte: (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023).

houve o começo do investimento governamental para o desenvolvimento eólico para produção de energia elétrica já com testes de perfil aerodinâmicos utilizados em aviões (Ajao e Mahamood, 2009).

Finalmente, na Rússia, em 1931, começou o desenvolvimento de aerogeradores para o fornecimento de energia em rede (Sherman, 2007), desde então a geração eólica aumentou continuamente até ter de produção elétrica mundial em 2023 cerca de 1 TW de potência (Gu *et al.*, 2024).

1.2 Mecânica dos fluidos computacional

Em 1972 e 1973, foi desenvolvido o modelo de turbulência k-epsilon (Launder e Spalding, 1972), um modelo RANS (Reynolds Average Navier Stokes) que conserva a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação turbulenta e as usa para equacionar a viscosidade turbulenta segundo a hipótese de Boussinesq (Reynolds, 1895), (Boussinesq, 1877). A aplicação do modelo k-epsilon foi possível pois, nesse mesmo período, também foi desenvolvido o modelo de acoplamento de pressão-velocidade SIMPLE, que permitiu a resolução de um problema de forma numérica.

Na década de 90 foi desenvolvido o modelo k-ômega, que usa um novo parâmetro, o ômega, ou taxa de dissipação específica, para melhor resolver problemas perto de condições de parede, que é o grande problema do modelo k-epsilon (Launder e Spalding, 1983). Também foi desenvolvido o modelo k-w SST (Shear Stress Transport), que, ainda utilizando o ômega, muda automaticamente seu equacionamento de acordo com a proximidade com a parede, permitindo uma flexibilidade de aplicação que o tornou aplicável em diversas situações de análise aerodinâmica, com precisão, replicabilidade e custo computacional baixo em relação a modelos mais robustos como o LES (Large Edge Simulation) e o DNS (Direct Navier Stokes). (Ren *et al.*, 2023)

2 OBJETIVO

O objetivo principal desta dissertação é comparar a potência fornecida por um gerador eólico com duas pás com e sem a adição de geradores de vórtex, por uso de simulação numérica, a diferentes rotações com a mesma velocidade do vento, as pás são reprojetadas para terem um desempenho máximo em cada rotação de análise. Os objetivos específicos estão descritos a seguir.

2.1 Projeto de uma pá eólica de eixo horizontal utilizando perfil NACA de 4 dígitos

O escopo do projeto incluiu o uso de um perfil único para a pá eólica e foi limitado a um perfil NACA de 4 dígitos. Dessa forma, a replicabilidade e validação podem ser mais facilmente realizadas.

2.2 Projeto de geradores de vórtex para a nova pá

Com a pá definida e dadas as condições médias de velocidade do vento, é feita uma pesquisa com os tipos de projeto de geradores de vórtex (VGs) que sejam mais adequados às condições médias de operação da pá, levando em consideração o tipo de perfil e os parâmetros adimensionais do escoamento.

2.3 Análise comparativa do desempenho da nova pá com geradores de vórtex

Após o projeto dos VGs ser feito, o seu desempenho é analisado e comparado com o previsto pela simulação sem os VGs.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em julho de 2025, foi realizada uma pesquisa na base Scopus, considerando as seguintes palavras: ("vortex generator"OR "generator vortex"OR "VG") AND ("cfd"OR "Computational Fluid Dynamics") AND ("method"or "approach"or "wind energy"OR blade OR "wind power"OR turbine OR aerodynamic) e tendo como filtro: tipo de documento artigo e review, lingua inglês, tipo de fonte jornal, e estágio de publicação final.

Considerando as seguintes áreas Engineering (127), Energy (49), Mathematics (29), Environmental Science (20), Computer Science (16), Materials Science (4), Multidisciplinary (4), foram encontrados 156 documentos distribuídos desde 1992.

Essa revisão busca avaliar as tendências de publicações na área de Vortex Generation ligada com CFD e/ou Energia Eólica, considerando o contexto mundial e o Brasil, por meio de uma análise bibliométrica que é um método para explorar e analisar dados científicos.

Alguns artigos, tais como (Donthu *et al.*, 2021) e (Aria e Cuccurullo, 2017), foram utilizados para embasar a metodologia bibliométrica, observando as diferentes técnicas e orientações para realizar uma análise bibliométrica confiável. Por meio dessa análise, é possível analisar a tendência de crescimento de artigos e periódicos da área em estudo, bem como os polos com as maiores publicações da área e quais documentos estão recebendo mais citações, além de outros parâmetros.

Para isso, foi realizado um levantamento utilizando a base de dados Scopus e a ferramenta do Bibliometrix, que é um pacote de análise bibliométrica que pode ser baixado e usado na linguagem R, juntamente com o pacote Bibliometrix R, sendo a ferramenta Biblioshiny, que é uma interface aplicável ao Bibliometrix para facilitar o uso do software bibliométrico, utilizada para gerar os gráficos.

Considerando o contexto nacional, realizou-se uma nova busca na base Scopus, na qual se filtraram apenas documentos relacionados ao Brasil, ou seja, documentos que continham pelo menos um de seus autores vinculados às instituições brasileiras, encontrando apenas 4 documentos.

A Tabela 1 mostra as informações gerais sobre os dados gerados pelo Bibliometrix com relação à pesquisa realizada.

A Figura 3 mostra a produção científica anual, com os parâmetros de pesquisa utilizados, desde 1992, que foi quando houve o primeiro artigo no conjunto de dados considerado, e os trabalhos aprovados em 2025, em que se percebe nitidamente o aumento das publicações

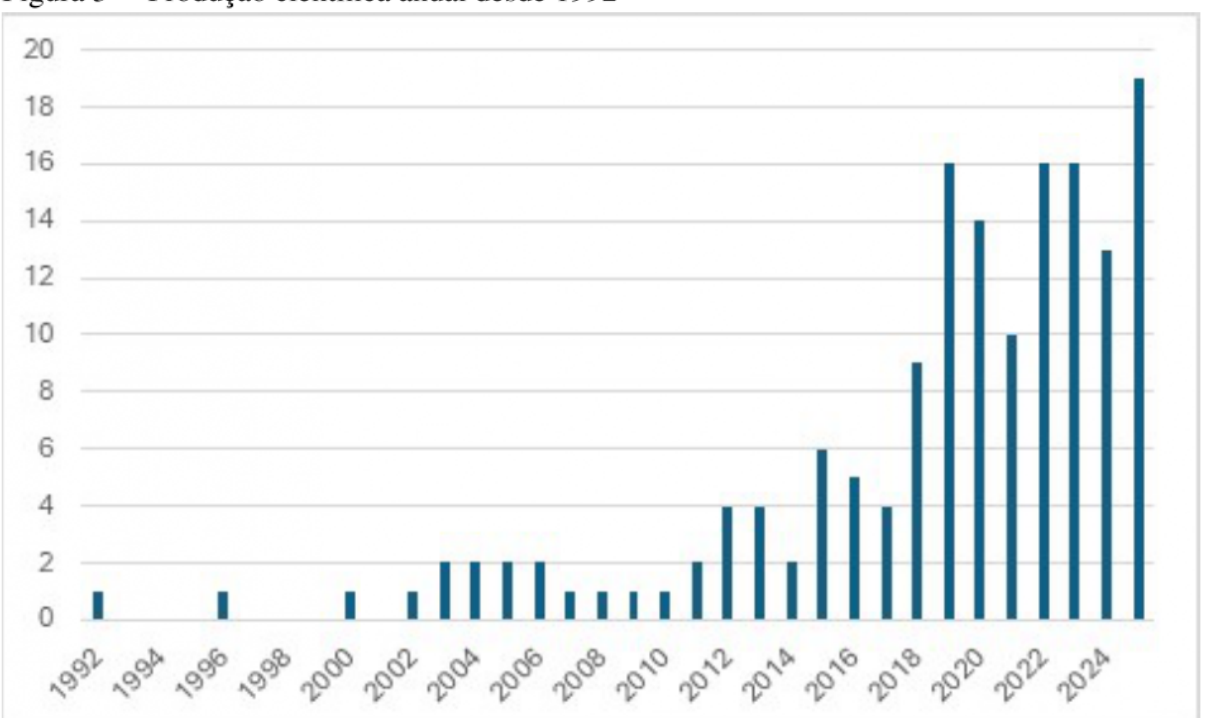
Tabela 1 – As principais informações sobre os dados gerados pelo Bibliometrix.

Informação	Resultado
Período de tempo	1992:2025
Fontes	87
Documentos	156
Média de citações por documento	19,44
Autores	537
Co-Autores por Documento	3,73
Artigo	152
Revisão	4

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

nessa área principalmente nos últimos anos.

Figura 3 – Produção cientifica anual desde 1992



Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

A Figura 3 mostra o número total de publicações por ano no período considerado, em que se percebe o aumento de publicações ao longo dos últimos anos.

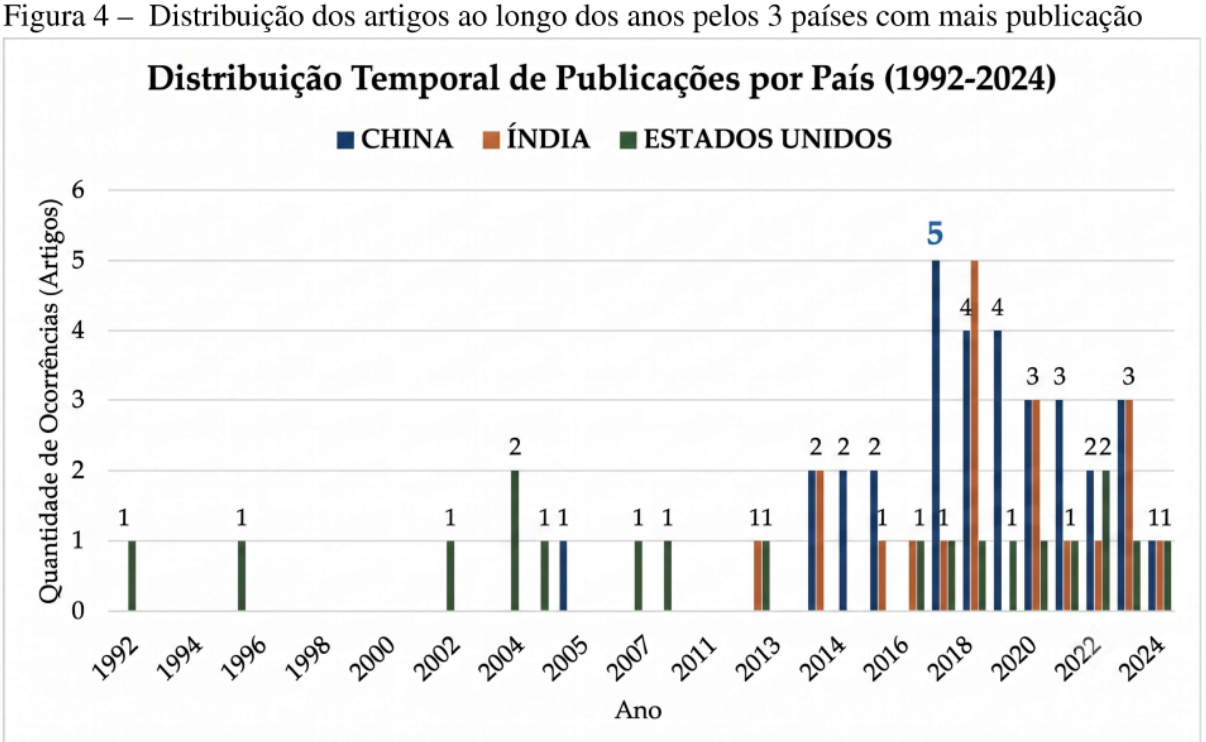
O primeiro artigo dentro dos parâmetros de pesquisa usados, foi de (Rhoades e Healey, 1992), publicado na revista “Journal of Aircraft” e já tendo recebido 45 citações. Posteriormente, veio o trabalho de (Reichert e Wendt, 1996), publicado em AIAA Journal, estando com 97 citações e FWCI 3,30. Em 2000, nesse conjunto de dados, há o trabalho de (Alkabie, 2000), com 20 citações e em 2002, começa uma constância nas publicações, com o trabalho de (Küpper e Henry, 2002), pulicado na revista “International Journal for Numerical

Methods in Fluids", e estando com 20 citações.

Dentre os trabalhos mais recentes, pode-se citar o trabalho de (Im *et al.*, 2025), com o título "Investigation of effective design and application of vortex generators for the wind turbine blades" publicado na revista "Journal of Mechanical Science and Technology", o trabalho de (Khare e Khurana, 2025), com o título "Detached Eddy Simulation of Micro-Vortex Generators Mounted on NACA 4412 Airfoil", publicado na revista "Journal of Fluids Engineering", o artigo de (Satrio *et al.*, 2025), com o título "Investigation of enhanced peak lift performance and stall angle delay by attachment of Vortex Generators on blade surfaces of Vertical Axis Ocean Current Turbine", e o documento "Aerodynamic Analysis of Flow over NACA 0015 Aerofoil with Vortex Generators and Leading Edge Tubercles" de (Sundaravadivel *et al.*, 2025).

Ainda em 2025, pode-se citar os trabalhos de (Szabó *et al.*, 2025), intitulado "Numerical investigation of miniature vortex generators on an airfoil", publicado no Journal "Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering", e o artigo de (Solnay *et al.*, 2025) com o título "Effects of Location and Height of Vortex Generators on Aerodynamic Performance of NACA 4412 Airfoil". Na Figura 4, é exposta a distribuição entre os quatro principais países com mais publicações nesta área ao longo dos anos.

Figura 4 – Distribuição dos artigos ao longo dos anos pelos 3 países com mais publicação



Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

O número total de publicações cresceu nos últimos anos, considerando o contexto

mundial, o que leva a acreditar na importância e atualidade do tema, verificando-se o mesmo comportamento quando se analisa os três países individualmente, observando ainda que já no início de 2025, alguns países já publicaram mais do que o que publicaram em anos anteriores.

A Tabela 3 mostra os 11 periódicos que mais têm publicação na área, tendo destaque a revista "ENERGIES" que se encontra com 8 documentos, correspondendo a um pouco mais de 5% do total de documentos encontrados no conjunto de dados analisados.

Dentre os trabalhos encontrados na Energies, pode-se citar o trabalho de (Hamdan *et al.*, 2023), cujo título é "Experimental and Numerical Study of Novel Vortex Bladeless Wind Turbine with an Economic Feasibility Analysis and Investigation of Environmental Benefits", e já recebeu 8 citações. O artigo de (Parra *et al.*, 2023) com o título "Experimental Analysis of Bio-Inspired Vortex Generators on a Blade with S822 Airfoil", e com 4 citações.

Pode-se citar também o trabalho de (Chillon *et al.*, 2020) titulado de "JBAY modeling of vane-type vortex generators and study on airfoil aerodynamic performance", com 18 citações, e o documento de (Zhu *et al.*, 2019), cujo título é "Numerical investigation of passive vortex generators on a wind turbine airfoil undergoing pitch oscillations" e já recebeu 29 citações"

Tabela 2 – Ordem dos periódicos mais citados

Periódico	Rank
ENERGIES	1
JOURNAL OF AIRCRAFT	2
RENEWABLE ENERGY	3
OCEAN ENGINEERING	4
AEROSPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY	5
AIAA JOURNAL	6
INTERNATIONAL JOURNAL OF NUMERICAL METHODS FOR HEAT AND FLUID FLOW	7
INTERNATIONAL JOURNAL OF VEHICLE STRUCTURES AND SYSTEMS	8
JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING	9
JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY	10
JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY	11

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

Observa-se que o periódico com maior quantidade de artigos não é o que mais recebeu citações. E o periódico que mais recebeu citações foi o "Renewable Energy", e dentre os artigos desse periódico pode-se o citar o trabalho de (Gao *et al.*, 2015), cujo título é "Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines" e já recebeu 158 citações, cujo FWCI é 1,37, e o documento de (Moon *et al.*, 2023), com o título "Numerical and experimental validation of vortex generator effect on power performance improvement in MW-class wind turbine blade" e estando com 23 citações e FWCI 1,56.

Tabela 3 – Os 11 periódicos mais relevantes

Periódico Rank	TPs	h_{index}	Pr(%)	AC	TC	PY_{start}	IF	CiteScore
1	8	6	5,12821	18,5	148	2018	3,2	7,3
2	6	5	3,84615	36,66666667	220	1992	2,1	3,0
3	6	5	3,84615	41	246	2015	9,1	17,6
4	5	3	3,20513	9,6	48	2018	5,5	8,4
5	4	3	2,5641	27,75	111	2017	5,8	10,3
6	4	4	2,5641	41,75	167	1996	2,8	3,1
7	4	3	2,5641	8	32	2018	5,0	6,0
8	4	1	2,5641	0,75	3	2020	0,8	1,3
9	4	3	2,5641	13,75	55	2009	2,4	3,0
10	4	3	2,5641	14,25	57	2012	2,0	3,2
11	4	4	2,5641	20,5	82	2017	1,9	2,2

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025
Note: TPs = Total de Publications; Pr(%) = Proporção; TC = Total de Citações; IF = Impact Factor in 2025; AC = Média de Citação = TC/TPs.

A análise dos autores mais produtivos (ver Tabela 4) revela FERNANDEZ-GAMIZ UNAI (Universidad del Pais Vasco, Leioa, Spain), como o autor com mais trabalhos e que mais recebeu citações considerando esse conjunto de dados analisados. Dentre seus trabalhos, pode-se citar (Urkiola *et al.*, 2017), publicado na revista "Aerospace Science and Technology", com 37 citações, FWCI de 3,00 e cujo título é "Computational characterization of the vortex generated by a Vortex Generator on a flat plate for different vane angles", e o artigo (Gutierrez-Amo *et al.*, 2018) com o título "Computational modelling of three different sub-boundary layer vortex generators on a flat plate" e 25 citações.

Tabela 4 – Os 2 autores em termos de números de documentos e número de citações

Autores	h_{index}	g_{index}	m_{index}	TC	NP	PY_{start}
FERNANDEZ-GAMIZ UNAI	6	7	0,6	145	7	2016
ZULUETA-GUERRERO EKAITZ	4	4	0,444	80	4	2017

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

O segundo autor mais produtivo é ZULUETA-GUERRERO EKAITZ, também da Universidad del Pais Vasco, Leioa, Spain, e do mesmo grupo do pesquisador FERNANDEZ-GAMIZ, onde todos os seus trabalhos, considerados nesse conjunto de documentos, têm a participação de FERNANDEZ-GAMIZ. A Tabela 5 mostra a relação de alguns dos trabalhos mais citados, dentre todos os 156 artigos, mostrando o título do trabalho, ano de publicação, total de citações, e a revista em que foi publicado.

Dentre os 156 documentos encontrados, 4 foram classificados como de revisão, podendo-se destacar o trabalho de (Fouatih *et al.*, 2019), cujo título é "Numerical/experimental

Tabela 5 – Os 40 documentos mais citados com a quantidade de citações

RANK	CITAÇÃO	TC	REVISTA
1	(Fuglsang e Bak, 2004)	220	Wind Energy
2	(Rooij e Timmer, 2003)	215	Journal of Solar Energy Engineering
3	(Ahmed *et al.*, 2012)	175	Renewable and Sustainable Energy Reviews
4	(Gao *et al.*, 2015)	158	Renewable Energy
5	(Wang *et al.*, 2017)	146	Energy
6	(Ferrouillat *et al.*, 2006)	137	Applied Thermal Engineering
7	(Jirasek, 2005)	121	Journal of Aircraft
8	(Reichert e Wendt, 1996)	97	AIAA Journal
9	(Zhen *et al.*, 2011)	64	Chinese Journal of Aeronautics
10	(Tinoco *et al.*, 2005)	52	The Aeronautical Journal
11	(Yan *et al.*, 2019)	46	J. Renewable Sustainable Energy
12	(Hwang *et al.*, 2012)	46	Journal of Mechanical Science and Technology
13	(Rhoades e Healey, 1992)	45	Journal of Aircraft
14	(Wijayanta *et al.*, 2018)	41	Energies
15	(Fernández-Gámiz *et al.*, 2016)	41	Wind Energy
16	(Hu *et al.*, 2019)	40	Aerospace Science and Technology
17	(Li e Ji, 2019)	38	Journal of Turbomachinery
18	(Urkiola *et al.*, 2017)	37	Aerospace Science and Technology
19	(Hamza e Aljabair, 2022)	35	Heliyon
20	(Forster e White, 2014)	35	AIAA Journal
21	(Maouedj *et al.*, 2021)	34	Computer Modeling in Engineering and Sciences
22	(Chen *et al.*, 2020)	34	Aerospace Science and Technology
23	(Mereu *et al.*, 2019)	33	Energy
24	(Zhou *et al.*, 2022)	31	Renewable Energy
25	(Pourfattah e Sabzpooshani, 2021)	31	Energy
26	(Gonçalves *et al.*, 2022)	30	Applied Energy
27	(Asli *et al.*, 2015)	30	Mathematical Problems in Engineering
28	(Yayla *et al.*, 2020)	29	Renewable Energy
29	(Salleh *et al.*, 2019)	29	Applied Thermal Engineering
30	(Zhu *et al.*, 2019)	29	Energies
31	(Varpe e Pradeep, 2015)	29	Journal of Fluids Engineering
32	(Meunier e Brunet, 2008)	28	Journal of Aircraft
33	(Dudek, 2006)	26	AIAA Journal
34	(Ma *et al.*, 2019)	25	Institution of Mechanical Engineers
35	(Gutierrez-Amo *et al.*, 2018)	25	Energies
36	(Moon *et al.*, 2023)	23	Renewable Energy
37	(Zhang *et al.*, 2020)	23	Energies
38	(Rosenfeld *et al.*, 2009)	23	Journal of Fluids Engineering
39	(Lee e Kwon, 2019)	22	Journal of Fluids Engineering
40	(Zhao *et al.*, 2017)	21	Journal of Aeronautical and Space Sciences

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

investigations on reducing drag penalty of passive vortex generators on a NACA 4415 airfoil", publicado na revista " Wind Energy" e estando com 18 citações, e o trabalho de (Ahmed *et al.*, 2012) , com o título "An overview on heat transfer augmentation using vortex generators and nanofluids: Approaches and applications", publicado no Journal "Renewable and Sustainable Energy Reviews" e estando com 175 citações.

No que se refere ao desempenho das instituições, as 20 mais produtivas, ou seja,

aquelas que mais desenvolveram artigos na área considerada, estão listadas na Tabela 6. Também são apresentados o número de artigos vinculados a elas, o país ou região onde estão localizadas e o percentual que cada uma representa diante do número global de publicações.

Tabela 6 – As 11 instituições com mais publicações relacionadas

RANK	INSTITUIÇÃO/AFILIAÇÃO	ARTIGOS	PAIS
1	UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO	29	Espanha
2	HOHAI UNIVERSITY	18	China
3	NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY	14	China
4	ABU DHABI UNIVERSITY	12	Emirados Arabes
5	CENTRAL SOUTH UNIVERSITY	8	China
6	CHINA SHIP SCIENTIFIC RESEARCH CENTER	8	China
7	INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH	8	Polônia
8	JEJU NATIONAL UNIVERSITY	8	Coreia do Sul
9	NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS	8	China
10	OCEAN UNIVERSITY OF CHINA	8	China
11	UNIVERSITEIT GENT	8	Bélgica

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

A UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO, localizada na Espanha lidera com 29 documentos, correspondendo a mais de 18% do total de trabalhos. Além disso, pode-se demonstrar que uma parte significativa das afiliações foi encontrada em instituições chinesas, onde, das 11 instituições com maior número de publicações, 6 estão na China, responsáveis por um total de 64 documentos, que correspondem a 41% das publicações gerais

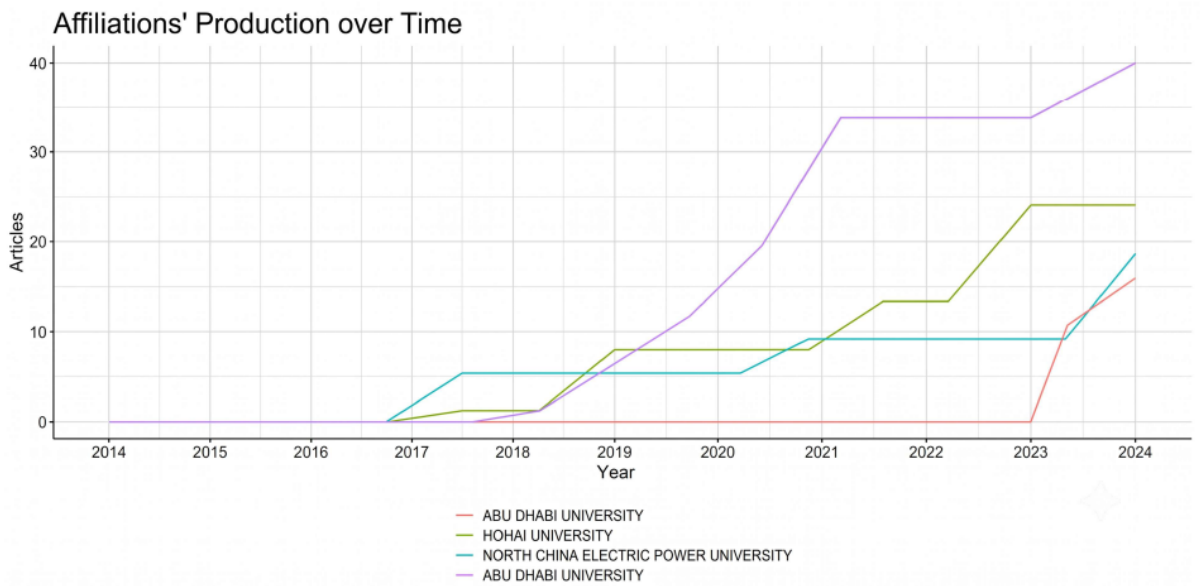
Dentre os artigos desenvolvidos por pesquisadores da UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO, pode-se citar o trabalho (Galera *et al.*, 2019), com o título “A triangular vortex generator modeling on a DU97-W-300 airfoil by a source term model”, que recebeu 12 citações.

A Figura 5 mostra a evolução das 4 primeiras instituições com maior número de publicações.

Os artigos contidos nesse conjunto de documentos têm autores de diferentes nacionalidades e ligados a instituições de diferentes países. Sendo assim, em relação ao número de documentos por país, a Tabela 7 mostra os países com sua quantidade de artigos, o total de citações que já receberam, a porcentagem de artigos com cooperação entre outros países, o artigo mais citado cujo primeiro autor é do país correspondente e quantas citações este recebeu.

O Bibliometrix permite a análise, por meio do uso e controle do Biblioshiny, da quantidade de publicações considerando o autor correspondente e observando se as publicações tiveram contribuição de autores de outros países. Sendo assim a Tabela 7 também mostra o número de artigos com base nos correspondentes países dos autores usados para analisar

Figura 5 – Produção das 4 principais instituições ao Longo do Tempo



Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

as publicações de um único país (SCP) que denota colaborações intra-países e publicações multi-países, publicações de vários países, (MCP) que denota colaborações internacionais.

Tabela 7 – Quantidade de documentos por país

Rank	Country	Articles	Articles %	SCP	MCP	MCP %
1	CHINA	31	19,6	25	6	19,4
2	INDIA	16	10,1	14	2	12,5
3	USA	9	5,7	9	0	0
4	SPAIN	8	5,1	8	0	0
5	KOREA	6	3,8	6	0	0
6	UNITED KINGDOM	6	3,8	6	0	0
7	FRANCE	5	3,2	3	2	40
8	IRAQ	5	3,2	3	2	40
9	ALGERIA	4	2,5	1	3	75
10	AUSTRALIA	4	2,5	3	1	25
11	BRAZIL	4	2,5	1	3	75
12	GERMANY	4	2,5	2	2	50
13	INDONESIA	4	2,5	2	2	50
14	MALAYSIA	4	2,5	3	1	25

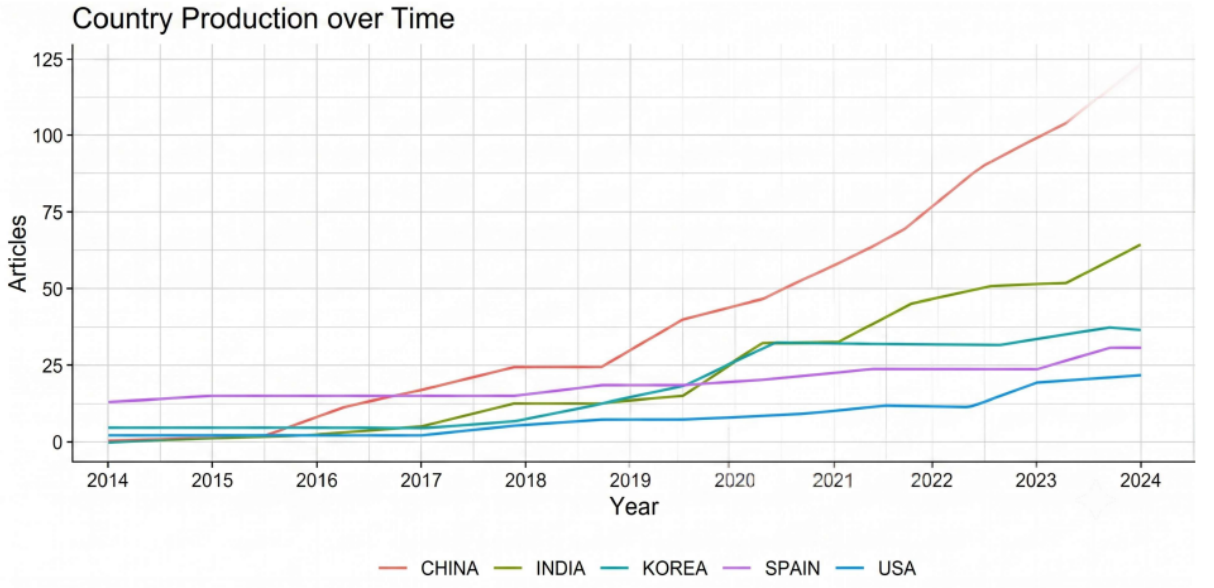
Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

E a Figura 6 mostra a evolução dos 5 países com mais publicações relacionadas nesse conjunto de dados ao longo do tempo.

3.1 Contexto Nacional

Considerando o contexto nacional, os trabalhos relacionados com autores e/ou instituições brasileiras são mostrados na Tabela 8. Destes, apenas um trabalho não tem participação

Figura 6 – Produção dos países ao longo do tempo



Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

de autores de instituições estrangeiras.

Tabela 8 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras

Citação	TC	Revista
(Silva e Salviano, 2019)	12	Journal of Solar Energy Engineering
(Garcia-Ribeiro *et al.*, 2023)	8	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers
(Parra *et al.*, 2023)	4	Energies
(Koopman *et al.*, 2021)	1	International Journal of Refrigeration

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

Tabela 9 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras parte 2

Citação	Instituição do 1º autor
(Silva e Salviano, 2019)	Sao Paulo State University (UNESP)
(Garcia-Ribeiro *et al.*, 2023)	Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
(Parra *et al.*, 2023)	Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia
(Koopman *et al.*, 2021)	Miami University, United States University of Santa Catarina, Florianópolis

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

As Figuras 7 e 8 mostram algumas das redes de colaboração entre os autores e instituições.

Quando se inseriu na base Scopus as palavras ("vortex generator"OR "generator vortex"OR "VG") AND ("cfd"OR "Computational Fluid Dynamics") AND ("method"or "approach"or "wind energy"OR blade OR "wind power"OR turbine OR aerodynamic) e se obteve o conjunto com 156 documentos que foram analisados, nem todos estão diretamente ligados

Tabela 10 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras parte 3

Citação	Instituições Brasileiras
(Silva e Salviano, 2019)	Sao Paulo State University (UNESP)
(Garcia-Ribeiro *et al.*, 2023)	Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
(Parra *et al.*, 2023)	Universidade de São Paulo, São Carlos
(Koopman *et al.*, 2021)	United States University of Santa Catarina, Florianópolis

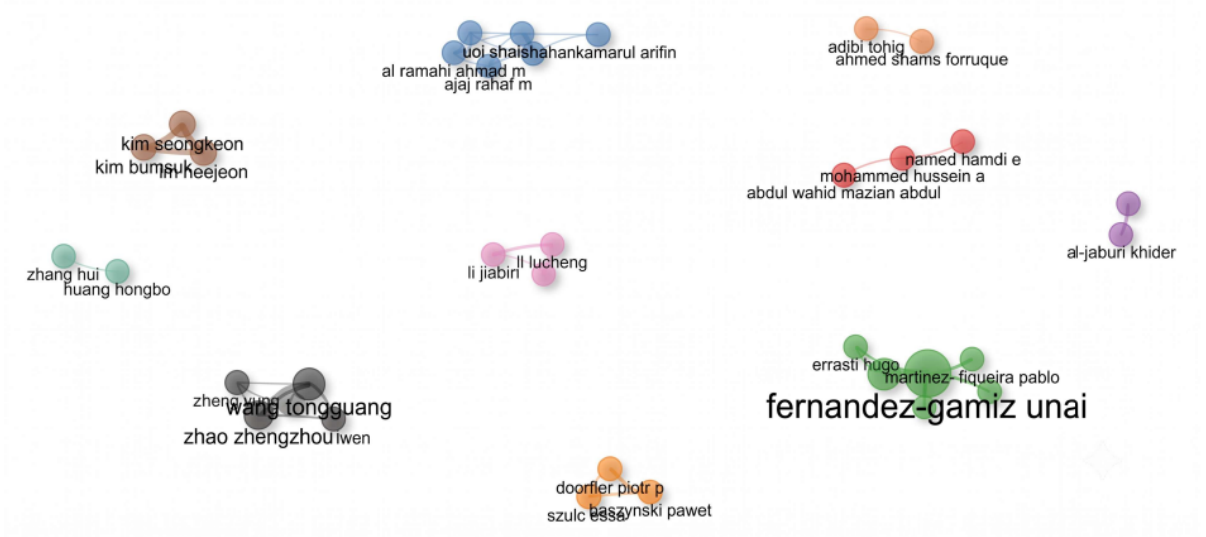
Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

Tabela 11 – Artigos com autores ligados a instituições brasileiras parte 4

Citação	Instituição Estrangeira
(Silva e Salviano, 2019)	X
(Garcia-Ribeiro *et al.*, 2023)	Universitaria Los Libertadores, Bogota, Colombia
(Parra *et al.*, 2023)	Universidad Distrital Francisco José de Caldas e Universidad Militar Nueva Granada
(Koopman *et al.*, 2021)	Miami University, United States

Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

Figura 7 – Rede de colaboração entre os autores

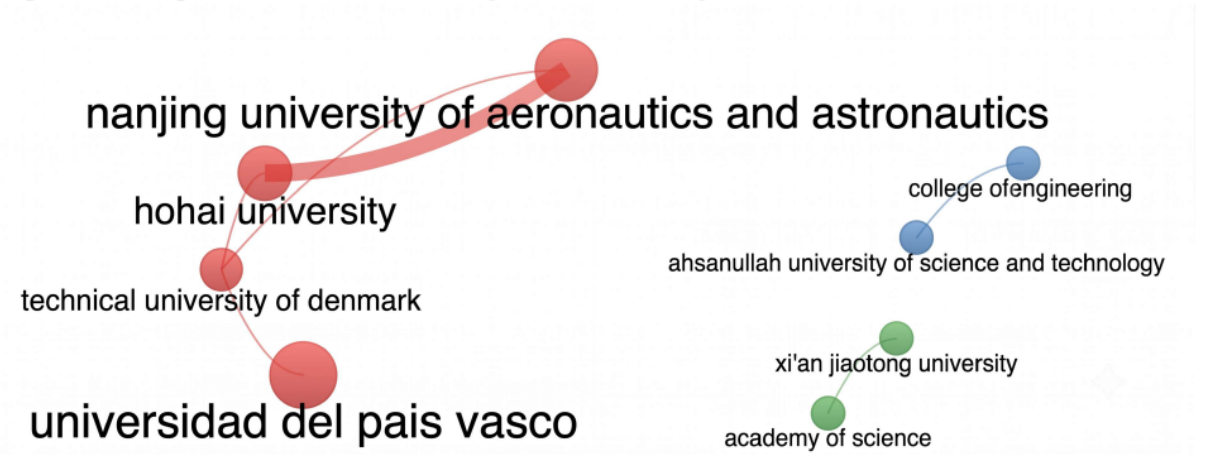


Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

ao tema da presente dissertação. Sendo assim, uma análise individual foi feita para identificar artigos ligados diretamente ao presente trabalho.

Dentre alguns que foram analisados, pode-se citar (Fuglsang e Bak, 2004), que recebeu 220 citações, cujo título é “Development of the Risø wind turbine airfoils”, o trabalho com o título de “Flow control on the NREL S809 wind turbine airfoil using vortex generators”, dos autores (Wang *et al.*, 2017), que tem 146 citações, o documento “Vortex-Generator Model and Its Application to Flow Control” de (Jirasek, 2005) com 121 citações e o artigo “Progress toward CFD for full flight envelope” de (Tinoco *et al.*, 2005) com 52 citações.

Figura 8 – Algumas redes de colaboração entre instituições



Fonte: Fonte: Base Scopus, ferramenta Bibliometrix, Jul.2025

O artigo "Scale-resolving CFD modeling of a thick wind turbine airfoil with application of vortex generators: Validation and sensitivity analyses" (Mereu *et al.*, 2019), com 33 citações, o documento "Numerical Analysis of Wind Turbine Airfoil Aerodynamic Performance with Leading Edge Bump" de (Asli *et al.*, 2015), com 30 citações, e os trabalhos "Empirical Model for Vane-Type Vortex Generators in a Navier-Stokes Code" (Dudek, 2006) e "Circulation Generation and Vortex Ring Formation by Conic Nozzles" (Rosenfeld *et al.*, 2009), "Numerical Simulation of Horizontal Axis Wind Turbines with Vortex Generators" (Lee e Kwon, 2019), "Numerical Investigations on Enhancement of Heat Transfer in a Compact Fin-and-Tube Heat Exchanger Using Delta Winglet Type Vortex Generators" (Jahromi *et al.*, 1999) e "Numerical and experimental validation of vortex generator effect on power performance improvement in MW-class wind turbine blade" (Moon *et al.*, 2023), são outros documentos a serem referenciados.

Dentre os documentos que receberam 18 citações, estão os trabalhos "Effect of vortex generators on hydrodynamic behavior of an underwater axisymmetric hull at high angles of attack" (Manshadi *et al.*, 2017), "Effect of Midwing Vortex Generators on V-22 Aircraft Forward-Flight Aerodynamics" (Tai, 2003).

No grupo dos que receberam 17 citações, estão os documentos "Effects of vortex generator on the hydrodynamic characteristics of hydrofoil and horizontal axis tidal turbine" (Liu *et al.*, 2023), "CFD based vortex generator design and full-scale testing for wake non-uniformity reduction" (Saydam *et al.*, 2018), "jBAY Modeling of Vane-Type Vortex Generators and Study on Airfoil Aerodynamic Performance" (Chillon *et al.*, 2020).

Os artigos "Multi-objective optimization of a novel butterfly-wing vortex generator fabricated in a rectangular microchannel based on CFD and NSGA-II genetic algorithm" (Das

e Hiremath, 2023), “A Global Approach to Turbomachinery Flow Control: Passage Vortex Control” (Bloxham e Bons, 2014), “Application and assessment of a GPU-based LES method for predicting dynamic wind loads on buildings” (Papp *et al.*, 2021), “Numerical investigation of the hydrothermal performance of novel vortex generators in a rectangular channel by employing inclination and rotational angles” (Fahad *et al.*, 2023), “Streamwise vortex generator for separation reduction on wind turbine rotors” (Suarez *et al.*, 2018), “Research on the Parametric Modelling Approach of Vortex Generator on Wind Turbine Airfoil” (Chen *et al.*, 2021), “Passive flow control application for rotorcraft in transonic conditions” (Embuena *et al.*, 2018), “Flow Characteristics Study of Wind Turbine Blade with Vortex Generators” (Hu *et al.*, 2016).

Dentre os documentos que estão com 7 citações, estão os trabalhos “CFD-Based In-Depth Investigation of the Effects of the Shape and Layout of a Vortex Generator on the Aerodynamic Performance of a Multi-MW Wind Turbine” (Moon *et al.*, 2021), “Adjoint-based optimization of a source-term representation of vortex generators” (Florentie *et al.*, 2018), “Hybrid RANS/LES for active flow control” (Wang *et al.*, 2014), “Computational Investigation of Vertical Stabilizer with Vortex Generators and Dorsal Fin” (Ito *et al.*, 2019).

Os trabalhos de (Wang *et al.*, 2022), (Zhao *et al.*, 2021), (Himo *et al.*, 2021), (Zastawny, 2016), (Liu, 2007), (Tiwari *et al.*, 2023), (Ballerstein e Horst, 2023), (Straub *et al.*, 2024), (Goharshadi e Mirzaei, 2022), (Gnatowska *et al.*, 2021), (Booker *et al.*, 2011), (Wijiatmoko *et al.*, 2024), (Baets *et al.*, 2024), (Schaffarczyk *et al.*, 2024), (Tebbiche e Boutoudj, 2019) também estão relacionados com o tema da presente pesquisa.

E dentre os trabalhos de 2025, pode-se citar (Khan *et al.*, 2025), (ŞUMNU e ERASLAN, 2025), (Khare e Khurana, 2025), (Bouderbala, 2025), (Konstantinovskaya *et al.*, 2024), que se encaixam no tema proposto a ser estudado.

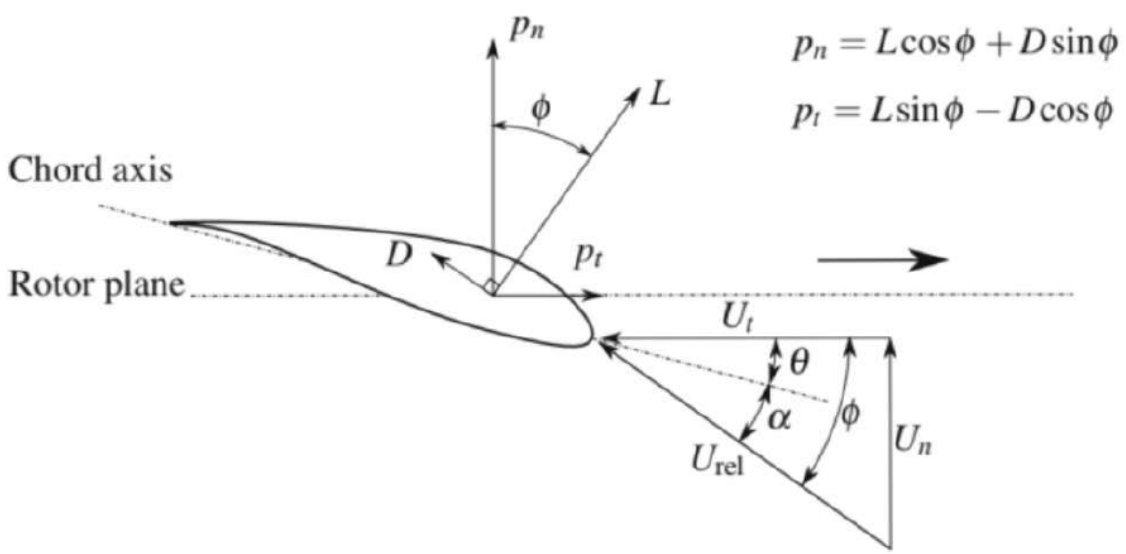
4 METODOLOGIA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Turbina Eólica

4.1.1 Turbina Eólica de eixo horizontal

Para projetar uma pá para aplicação eólica, foi escolhido um perfil NACA com alto coeficiente de sustentação, alto ângulo de ataque e alta razão sustentação por arrasto (Branlard, 2017). Com base em (Bingham e Noonan, 1974) e (Jacobs *et al.*, 1933), os perfis NACA estudados foram 0012, 0015, 0018, 2412, 4412, 4415 e o 6712, dentro dos quais o perfil NACA 6712, de acordo com os experimentos realizados, apresentou o melhor desempenho, dado que teve o maior produto sustentação por ângulo de ataque dentre todos os perfis NACA estudados, e nas turbinas eólicas de eixo horizontal, ao alterar levemente sua geometria, buscaram-se perfis com desempenho ainda melhor.

Figura 9 – Componentes de forças atuantes em uma seção de pá eólica



Fonte: (Branlard, 2017)

Segue a Equação 4.1 com os coeficientes normais e tangenciais atuantes em uma seção de pá eólica:

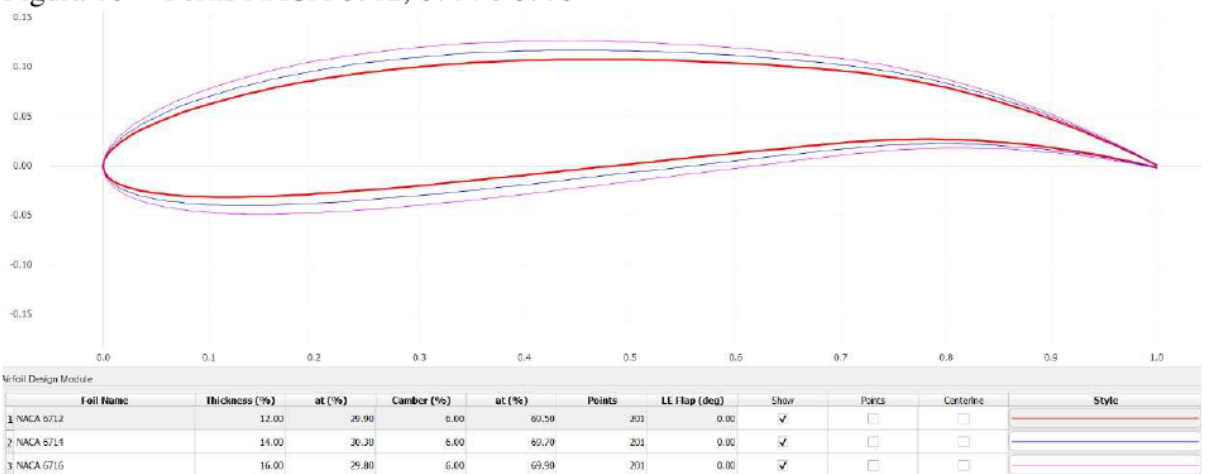
$$c_n = c_l cos(\phi)\left(1 + \frac{tan(\phi)}{\varepsilon_{l/d}}\right) c_t = c_l sin(\phi)\left(1 - \frac{cot(\phi)}{\varepsilon_{l/d}}\right) \tag{4.1}$$

Tabela 12 – Variações do perfil NACA 6712 escolhidos

Perfis NACA escolhidos
NACA 6714
NACA 6716

Fonte: AUTOR.

Figura 10 – Perfis NACA 6712, 6714 e 6716



Airfoil Design Module

	Foil Name	Thickness (%)	at (%)	Camber (%)	at (%)	Points	LE Flap (deg)	Show	Points	Centerline	Style
1	NACA 6712	12.00	29.90	6.00	60.50	201	0.00	✓			
2	NACA 6714	14.00	30.30	6.00	60.70	201	0.00	✓			
3	NACA 6716	16.00	29.80	6.00	69.90	201	0.00	✓			

Fonte: QBlade.

Primeiramente, o perfil foi projetado para uso comercial, e, de acordo com (Jaber *et al.*, 2024), diversos geradores comerciais de eixo horizontal têm 2MW de potência fornecida, e, consequentemente, o gerador eólico foi construído para se aproximar dessa potência.

No gerador eólico de eixo horizontal, a razão entre o comprimento da pá e o raio do eixo de suporte foi escolhida como 20, assim como em (Marzouk *et al.*, 2019), essa razão será utilizada para o projeto do gerador. O comprimento da corda e o ângulo de torção foram calculados de acordo com a teoria de Schmitz, dado seu melhor resultado quando comparado com a teoria de Betz (Balijepalli *et al.*, 2018).

No Brasil, o litoral cearense pode ter ventos médios se aproximando de 10 m/s (REBOUCAS FILHO *et al.*, 2018). Utilizando tal dado e as informações anteriores, projetou-se uma turbina eólica de duas pás, com comprimento de pá de 40 metros e potência nominal de 2MW de modo a ser utilizada no litoral cearense, ou seja, com velocidade média dos ventos de 10 m/s, assim como feito em (Jaber *et al.*, 2024), para os geradores de eixo horizontal, de modo que tais valores sejam a premissa do projeto.

A análise das pás eólicas foi comparativa para casos com e sem geradores de vórtex. Para a análise preliminar, foi utilizado o software QBlade, que utiliza a metodologia Lifting Line Free Vortex Wake Method (Marten *et al.*, 2016), sendo que, dentro da modelagem e simulação bidimensional, o QBlade utiliza o software XFoil para calcular os coeficientes de sustentação

e arrasto para cada ângulo de ataque em cada número de Reynolds, sendo que o XFoil utiliza um método de painel de vorticidade linear, não viscoso e com correção Karman-Tsien para a compressibilidade. A principal limitação do XFoil se dá nos valores incoerentes para ângulos de ataque nos quais há um descolamento da camada limite muito acentuado, apesar de prever bem o estol (Morgado *et al.*, 2016).

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas de um fluido, sendo dependente da densidade do fluido, da velocidade do fluido em escoamento, de um comprimento característico e da viscosidade dinâmica do fluido. O número de Mach é um valor adimensional que mede o quão próximo da velocidade de propagação do som no fluido a velocidade do fluido está, e ele depende da velocidade do som no fluido e da velocidade do escoamento . As características de rotação da pá eólica de eixo horizontal são normalmente expostas pelo uso do parâmetro da velocidade da ponta da pá, ou, em inglês, Tip Speed Ratio (TSR) que relaciona a velocidade angular na ponta da pá com a velocidade do escoamento (Fox *et al.*, 2000).

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{4.2}$$

$$M = \frac{V_0}{V_{som}} \tag{4.3}$$

$$TSR = \frac{\omega r_{max}}{V_0} \tag{4.4}$$

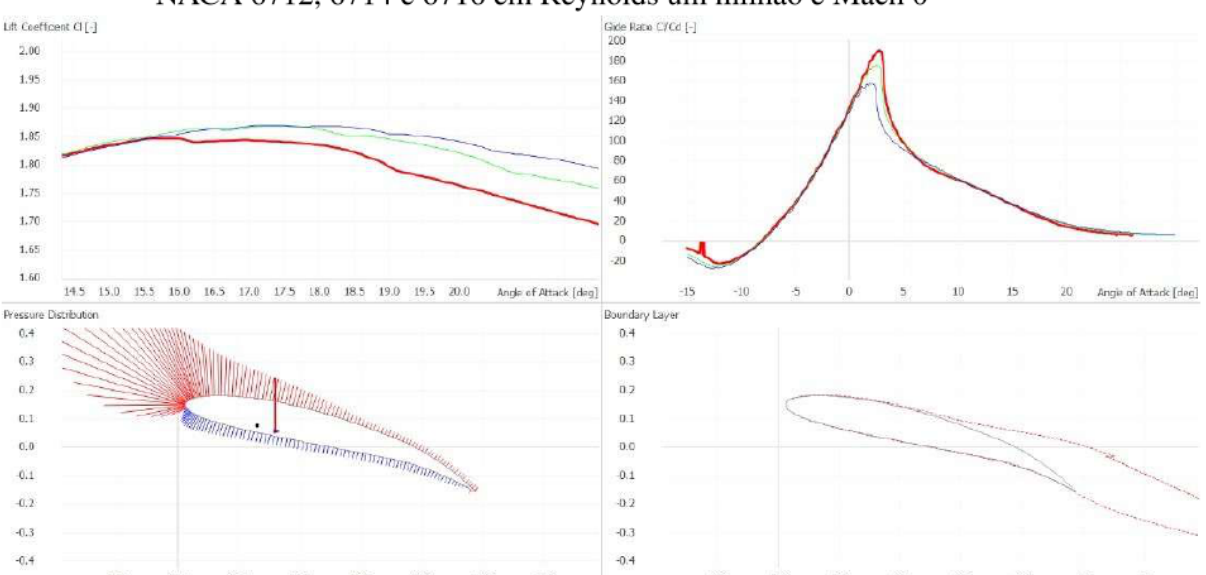
O QBlade é um software que permite a escolha ou importação de um perfil aerodinâmico bidimensional, a simulação ou importação dos gráficos por ângulo de ataque do coeficiente de sustentação, arrasto e momento desse perfil e o uso dele para modelar turbinas eólicas verticais ou horizontais por seções ao longo da pá, assim como a otimização dos ângulos de ataque e comprimento de corda em cada seção.

O QBlade, depois de definidos os perfis de cada seção da pá eólica, do tipo da pá, número de Reynolds e número de Mach, usa a metodologia BEM para, em uma determinada velocidade de rotação e velocidade incidente, calcular o equilíbrio entre as forças de propulsão do vento e as forças de desaceleração com o cálculo iterativo dos fatores de indução axial e angular.

A simulação dos coeficientes de sustentação, arrasto e momentos por ângulo de ataque é feita pelo software XFoil embutido no QBlade, que usa formulações integrais para calcular a espessura de deslocamento e a espessura de quantidade de movimento, e, com elas, o método dos painéis é aplicado para recalcular a geometria efetiva, que modifica as espessuras de deslocamento de quantidade de movimento, promovendo uma iteração que, ao convergir, permite o cálculo dos coeficientes de sustentação e arrasto.

Os gráficos dos coeficientes de sustentação e razão sustentação por arrasto para os perfis escolhidos, de acordo com a equivalência de cores na Figura 10 na condição inicial de simulação, ou seja, o software QBlade inicia uma análise de um perfil qualquer com o número de Reynolds de um milhão e número de Mach 0: Após os passos de modelagem das pás, foi feita uma correção para obter os valores de Reynolds e Mach adequados para a simulação, utilizando-os para recalcular os perfis das pás e os coeficientes de potência e parâmetros pertinentes, tais coeficientes estão expostos nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Gráficos sustentações e características aerodinâmicas para os perfis bidimensionais NACA 6712, 6714 e 6716 em Reynolds um milhão e Mach 0

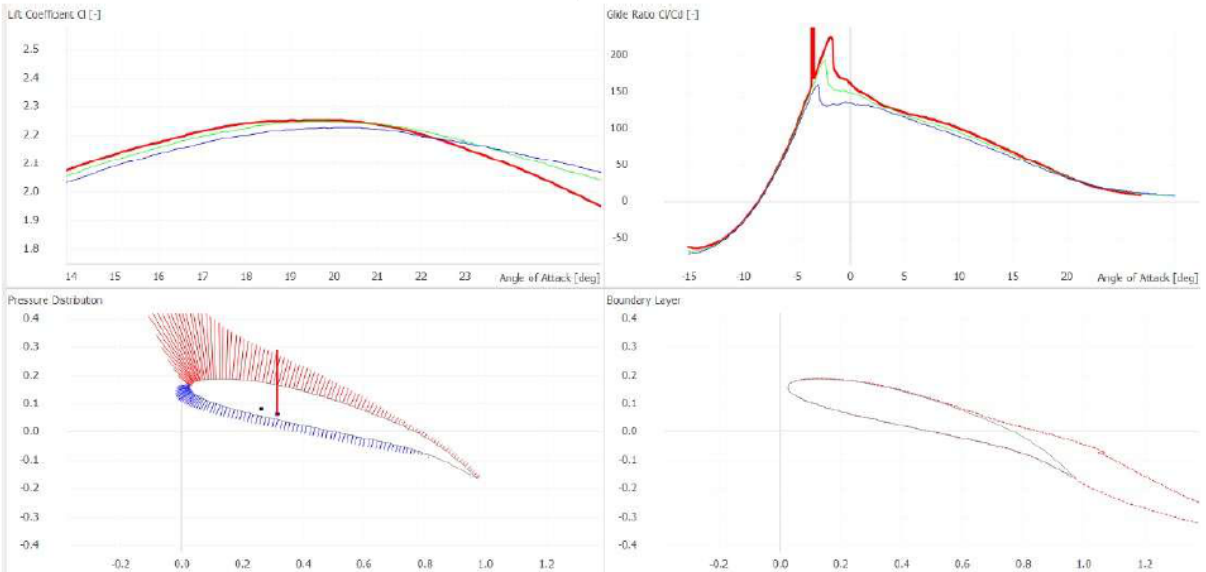


Fonte: QBlade.

Os gráficos de coeficientes de sustentação e arrasto expostos na Figura 11 sugerem uma proximidade nos valores de sustentação e arrasto em todos os perfis NACA nessa condição de Reynolds e Mach, mas, já que a condição de operação otimizada apresentou Reynolds e Mach maiores, é esperado um desempenho superior a essa condição de referência.

As curvas obtidas na Figura 11 e 12 foram feitas pelo XFoil, dentro do software QBlade, com os resultados, é necessário realizar uma extrapolação em 360 graus para o modelo

Figura 12 – Gráficos sustentações e características aerodinâmicas para os perfis bidimensionais NACA 6712, 6714 e 6716 em Reynolds 13 milhões e Mach 0.176



Fonte: QBlade.

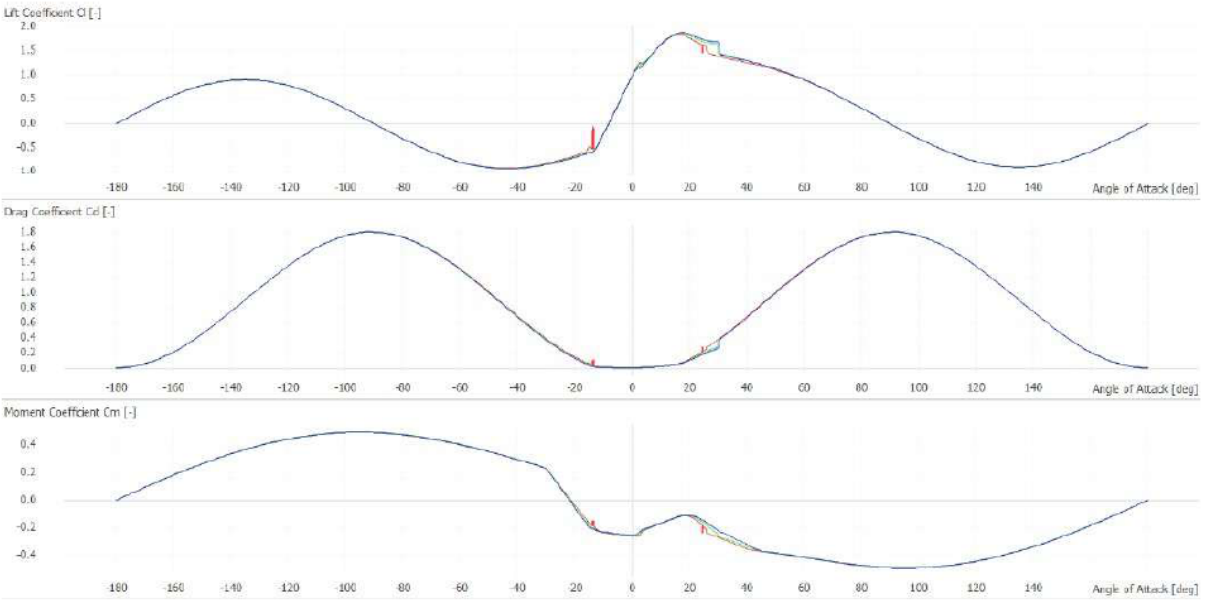
Tabela 13 – Número de Reynolds e Mach finais para as perfis aerodinâmicos simulados

Reynolds	Mach
13000000	0.176

Fonte: AUTOR.

fornecer os coeficientes de sustentação, arrasto e de momento em função de cada ângulo de ataque possível, para tanto, o software QBlade fornece duas alternativas, Montgomerie e Viterna (Montgomerie, 2004) (Mahmuddin *et al.*, 2017) (Viterna e Janetzke, 1982), no Viterna o comportamento dos coeficientes de sustentação e arrasto é dado a partir do ângulo de estol ou do ângulo limite caindo de acordo com uma função dependente de fatores trigonométricos decrescentes, até atingir 90 graus, enquanto o Montgomerie admite um comportamento ponderado entre placa plana e escoamento potencial. Dado que a simulação feita pelo XFoil foi realizada até depois da condição de máximo coeficiente de sustentação, preferiu-se optar pelo modelo Viterna, o qual costuma ser mais utilizado em ambientes industriais e em condição pós-estol, condicionando a extrapolação a não passar dos limites de coeficiente de sustentação, de arrasto e de momento já simulados (Souza, 2018).

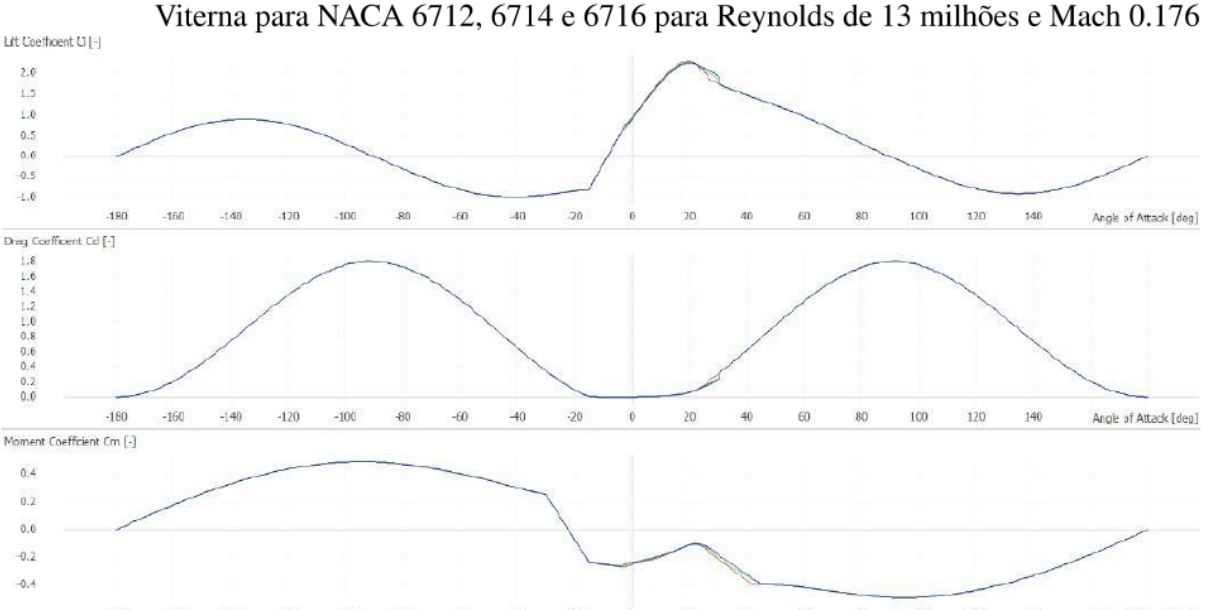
Figura 13 – Gráficos extrapolação dos coeficientes de sustentação, arrasto e momento por Viterna para NACA 6712, 6714 e 6716 para Reynolds um milhão e Mach 0



Fonte: QBlade.

A condição de referência com os gráficos extrapolados expõe uma quase sobreposição de coeficientes de sustentação e arrasto, sendo que o arrasto tem seu valor máximo com 90 graus de ângulo de ataque, como previsto, e, por exemplo, com 20 graus de ângulo de ataque, o valor do coeficiente de arrasto vale aproximadamente 0,1. O coeficiente de sustentação, nesse caso, apresenta valor simulado com máximo a aproximadamente 16 graus de ângulo de ataque e valor de 1,8.

Figura 14 – Gráficos extrapolação dos coeficientes de sustentação, arrasto e momento por Viterna para NACA 6712, 6714 e 6716 para Reynolds de 13 milhões e Mach 0.176



Fonte: QBlade.

Nessa condição, fora da referência, ocorre novamente uma quase sobreposição de coeficientes de sustentação e arrasto, com o comportamento e valores de arrasto praticamente idênticos aos dos valores de referência, por outro lado, no coeficiente de sustentação, o ângulo de ataque de valor máximo aumentou para cerca de 20 graus e o coeficiente de sustentação máximo aumentou para cerca de 2.2, ou seja, houve um aumento de desempenho efetivo com essa nova condição de número de Reynolds e Mach assim como esperado.

As outras extrapolações têm perfis análogos ao exposto na Figura 14, com queda do coeficiente de sustentação após o coeficiente de sustentação máximo, com valor zero em múltiplos de 90 graus diferentes de zero e alternando o sinal do coeficiente ao passar por tais múltiplos.

O procedimento de simulação preliminar consistiu em iniciar a análise com TSR de 5, utilizar esse valor para otimizar com uso do QBlade os comprimentos de corda e ângulos de torção, depois calcular o número de Reynolds e Mach das seções, recalcular as curvas de arrasto e sustentação e reajustar os valores de corda e torção, prosseguindo iterativamente até a convergência e anotando-se os valores de coeficiente de potência e potência total; logo após, o TSR é acrescido de 1 com limite final de 8 e o procedimento é refeito enquanto a potência final continuar a aumentar.

Para as turbinas eólicas de eixo horizontal, em posse dos perfis e das curvas aerodinâmicas, é feita a modelagem das pás, utilizando a razão do comprimento da pá e do raio de suporte e o comprimento escolhido. Neste estudo, foi escolhida a modelagem com duas pás na turbina. Ao adicionar tais parâmetros, no software QBlade, o qual usa o modelo BEM e usa a previsão dos coeficientes de arrasto, sustentação e momento pelo software Xfoil internamente, em conjunto com um corretor por Reynolds e Mach, a pá pode ser particionada em várias seções, cujo valor foi 17, pois o coeficiente de potência não variou mais a partir de tal quantidade. Segue uma divisão obtida utilizando o perfil NACA 6712 com as posições das seções ao longo da pá, o comprimento da corda do perfil e o ângulo de torção do perfil, o qual foi feito em relação a um quarto da corda para mais se aproximar do centro de pressão da seção e com a otimização de ângulo de comprimento de corda adotada pela teoria de Schmitz.

Com as geometrias definidas em cada seção de cada perfil, foi realizada uma simulação tipo BEM (Blade Element Momentum) com o software QBlade para obter os gráficos de coeficiente de potência e potência total em função do TSR (Tip Speed Ratio), dado que o QBlade permite a modelagem das pás, curva de afilamento, ângulo de torção ótimo por TSR, assim como

Tabela 14 – Comprimento da corda por posição relativa nas pás NACA 6712-6714-6716

Posição relativa (μ)	Corda NACA 6712(m)	Corda NACA 6714(m)	Corda NACA 6716
0	9,228	9,303	9,651
0,0625	12,732	12,834	13,315
0,125	12,405	12,505	12,974
0,1875	11,094	11,183	11,602
0,25	9,735	9,814	10,181
0,3125	8,557	8,626	8,949
0,375	7,581	7,642	7,928
0,4375	6,779	6,833	7,089
0,5	6,115	6,165	6,395
0,5625	5,562	5,607	5,816
0,625	5,095	5,136	5,328
0,6875	4,697	4,735	4,912
0,75	4,355	4,390	4,555
0,8125	4,058	4,091	4,244
0,875	3,798	3,828	3,971
0,9375	3,568	3,597	3,731
1	3,364	3,391	3,518

Fonte: AUTOR.

Tabela 15 – Ângulo de torção por posição relativa nas pás NACA 6712-6714-6716

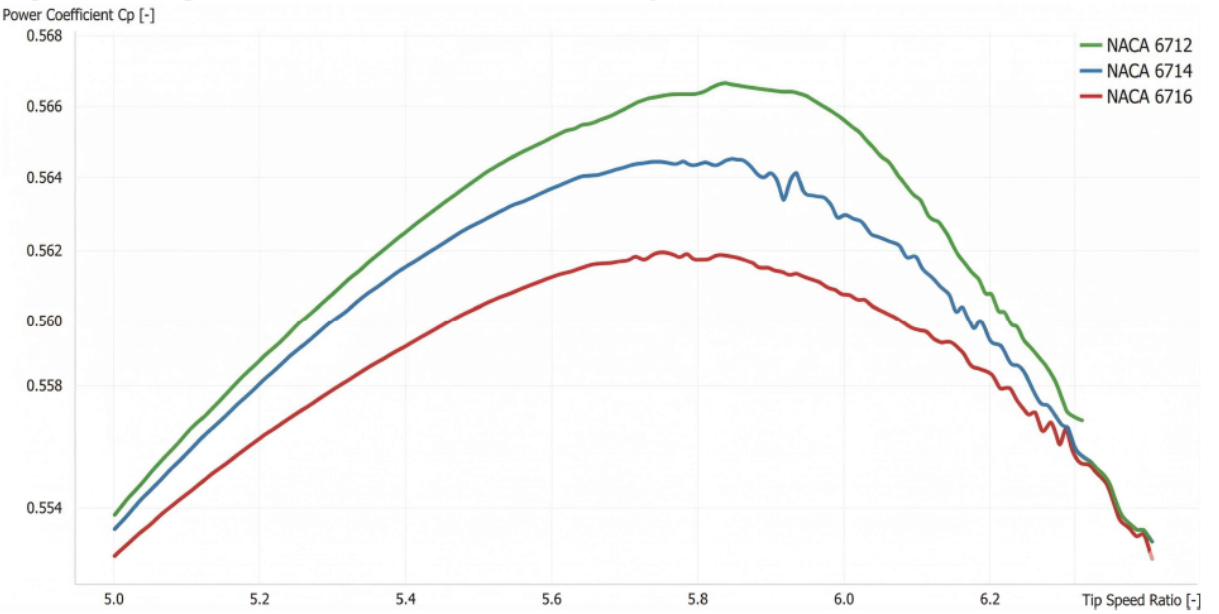
Posição relativa (μ)	Torção NACA 6712 (graus)	Torção NACA 6714 (graus)	Torção NACA 6716 (graus)
0	49,27	49,17	49,27
0,0625	38,08	37,98	38,08
0,125	29,90	29,80	29,90
0,1875	24,16	24,06	24,16
0,25	20,07	19,97	20,07
0,3125	17,08	16,98	17,08
0,375	14,82	14,72	14,82
0,4375	13,06	12,96	13,06
0,5	11,67	11,57	11,67
0,5625	10,53	10,43	10,53
0,625	9,59	9,49	9,59
0,6875	8,80	8,70	8,80
0,75	8,13	8,03	8,13
0,8125	7,55	7,45	7,55
0,875	7,04	6,94	7,04
0,9375	6,60	6,50	6,60
1	6,21	6,11	6,21

Fonte: AUTOR.

previsão de potência e torque. Ao comparar os gráficos, é possível escolher os dois melhores perfis em função do coeficiente de potência e da potência total fornecida, tanto no caso com o TSR de 6 quanto no TSR de maior coeficiente de potência.

Como exposto na Figura 15, os perfis NACA 6712 e 6714 foram superiores em termos de coeficiente de potência e potência total em relação ao NACA 6716; portanto, os perfis NACA 6712 e 6714 foram adotados para as análises que seguem.

Figura 15 – Cp NACAs 6712, 6714 e 6716 em função do TSR



Fonte: QBlade.

Tabela 16 – Coeficientes de potência para TSR 6 para os perfis NACA simulados

Naca	Cp	Potência Total (MW)
6712	0,566	1,920
6714	0,564	1,915
6716	0,561	1,905

Fonte: AUTOR.

A modelagem por BEM possibilitou uma previsão de potência próxima de 2MW como esperado para uma turbina dessa dimensão (Marzouk *et al.*, 2019). O coeficiente de potência obtido nos dois melhores perfis foi de 0,566 e 0,561, valores bem próximos do limite de Betz de 0,5926.

O procedimento sequencial adotado para modelar e simular a turbina de duas pás segue:

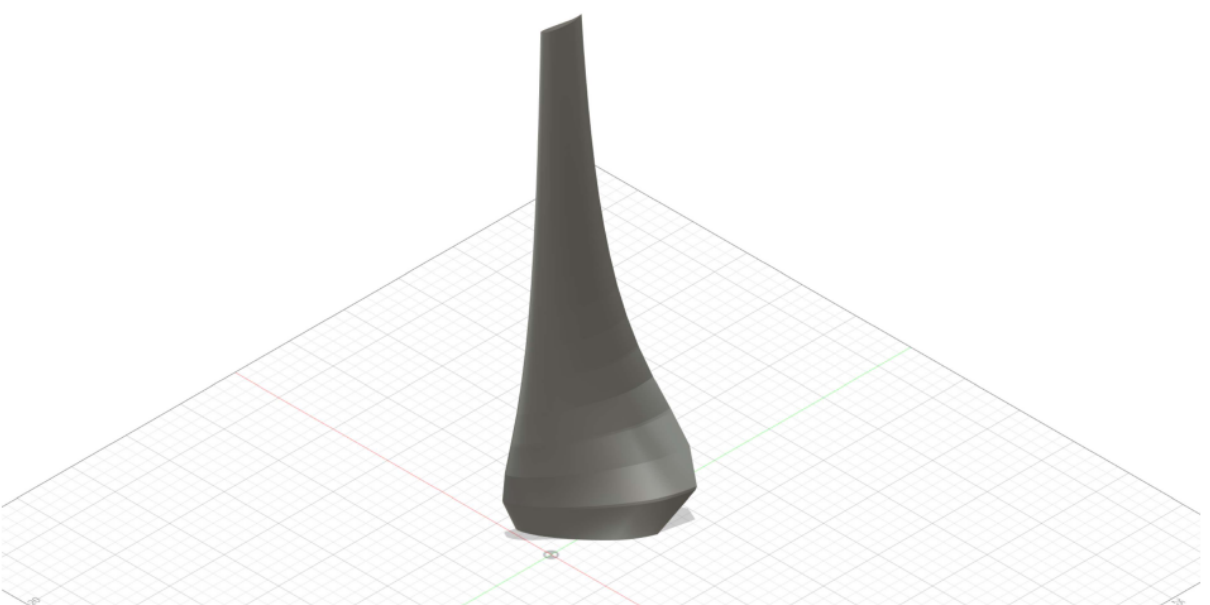
- Uso dos números de Reynolds e Mach nativos do QBlade
- Simulação com XFoil das curvas aerodinâmicas
- Extrapolação das curvas aerodinâmicas
- Modelagem das pás
- Otimização das pás
- Simulação da pá eólica
- Otimização da pá

- Escolha dos TSR
- Cálculo dos valores do Reynolds e mach

O software utilizado para o modelamento tridimensional das pás foi o Fusion 360 da Autodesk. Ele é um CAD, CAM e CAE que permite a importação de modelos tridimensionais, assim como o modelamento e a exportação, tal software foi utilizado na versão estudantil, pois alunos da UFC têm acesso às ferramentas da Autodesk por meio do e-mail institucional.

Seguem os modelos tridimensionais das pás de eixo horizontal:

Figura 16 – Modelo tridimensional da pá eólica NACA 6712 de eixo horizontal no software Fusion 360 para estudantes



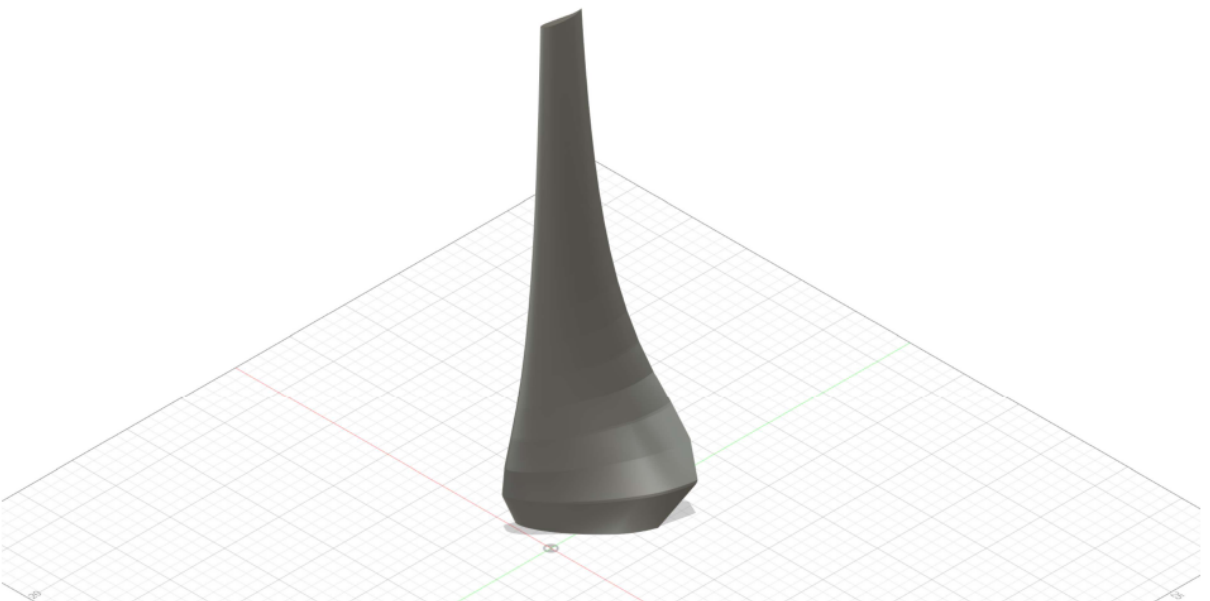
Fonte: AUTOR.

As Figuras 16, 17 e 18 foram feitas a partir das características geométricas das Tabelas 14 e 15, em que o perfil NACA 6712 foi subdividido em 201 pontos, como exposto na Figura 10, cada seção do perfil é conectada a próxima por uma interpolação linear, e o alinhamento dos perfil de diferentes comprimentos de corda e ângulo de torção ocorre por meio da colinearidade dos centros de pressão aerodinâmica localizados aproximadamente a um quarto da corda no sentido do bordo de ataque ao bordo de fuga do perfil.

4.2 Análise por CFD das pás

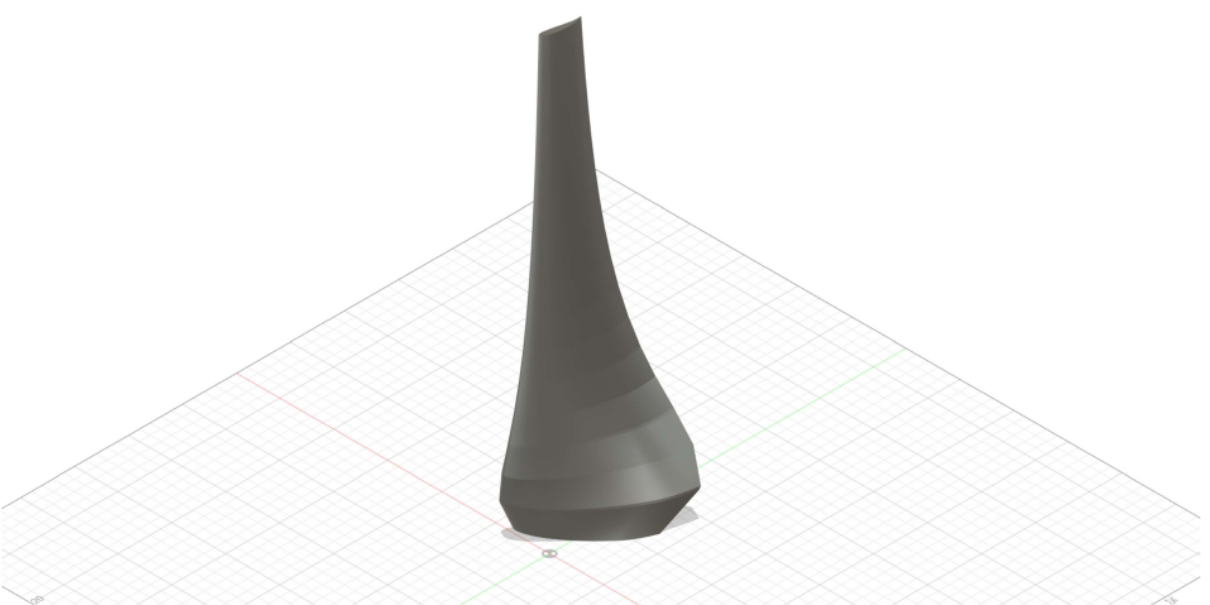
O software Ansys Fluent é uma ferramenta de simulação CFD, a qual permite tanto importar geometrias prontas quanto modelar nas ferramentas CAM presentes no próprio Ansys

Figura 17 – Modelo tridimensional da pá eólica NACA 6714 de eixo horizontal no software Fusion 360 para estudantes



Fonte: AUTOR.

Figura 18 – Modelo tridimensional da pá eólica NACA 6716 de eixo horizontal no software Fusion 360 para estudantes



Fonte: AUTOR.

Fluent as geometrias e modelos de interesse. Depois da modelagem, o Ansys Fluent permite a aplicação de ferramentas próprias de construção e modelagem de malha, com controle de tipo de malha, discretização local, discretização da camada limite e algoritmos de otimização de parâmetros qualitativos da malha. Naturalmente, também há a simulação CFD com, controle de

fluido de entrada, modelagem de escoamento de entrada com diferentes perfis de velocidade, com controle de turbulência, razão viscosa, temperatura, tipo de modelo de turbulência, incluindo RANS ou LES. O Ansys Fluente também conta com uma interface de pós-processamento com medição de temperatura, perfis de velocidade, perfis de turbulência, torque em relação a um determinado ponto, cálculos de FFT em distribuições temporais de forças, torques e outras variáveis mensuráveis por CFD.

Com o projeto preliminar realizado, obteve-se tanto uma previsão de potência pelo BEM do QBlade quanto o perfil da turbina. O perfil e volumes de controle da turbina foram então modelados no Fusion 360, depois exportados para serem simulados com uma ferramenta CFD tridimensional, o Ansys Fluent, para, com a turbina antes projetada, prever com melhor precisão a potência real, dado que o CFD costuma ser mais preciso que a metodologia BEM (Bangga, 2018). A pá escolhida foi a de maior coeficiente de potência, ou seja, o NACA 6712, sendo que a geometria foi otimizada para TSR de 5, 6, 7 e 8, ou seja, para cada TSR, com o mesmo comprimento de pá de 40 metros e as 17 subdivisões. O comprimento e ângulo de torção de cada seção foram alterados para buscar uma maior potência final fornecida. Tal alteração pode ser feita de forma semiautomática no QBlade.

O projeto da simulação CFD foi dividido nas seguintes etapas:

1. Volume de controle;
2. Construção de malha;
3. Condições de simulação.

4.2.1 Volume de controle

Com a geometria da turbina, foi utilizado um múltiplo do raio da pá para definir os limites do volume de controle, sendo eles adotados maiores que os limites definidos em (Hartwanger e Horvat, 2008) para maior precisão. O formato geométrico escolhido foi o cilíndrico, dada a sua utilização e validação em (Hartwanger e Horvat, 2008) nas turbinas de eixo horizontal. O formato das pás de eixo horizontal segue novamente para melhor expor as dimensões dos volumes de controle.

O volume de controle rotativo é um cilindro de 20 metros de altura e diâmetro de 90 metros. O volume de controle que engloba o volume rotativo da pá de eixo horizontal tem diâmetro de 400 metros e altura de 1000 metros sendo que a origem está a 200 metros de uma das bases (Rezaeiha *et al.*, 2017), (Rezaeiha *et al.*, 2018), (Mo *et al.*, 2021). A pá está direcionada ao

Tabela 17 – Afilamento nas pás NACA 6712 com TSR 5,6,7 e 8

Posição relativa (μ)	Corda TSR5(m)	Corda TSR6(m)	Corda TSR7(m)	Corda TSR8(m)
0	9,913	9,228	8,667	8,048
0,0625	14,868	12,732	11,036	9,492
0,125	15,474	12,405	10,159	8,327
0,1875	14,474	11,094	8,773	6,997
0,25	13,082	9,735	7,536	5,916
0,3125	11,726	8,557	6,535	5,082
0,375	10,528	7,581	5,738	4,435
0,4275	9,502	6,779	5,099	3,924
0,5	8,631	6,115	4,580	3,515
0,5625	7,889	5,562	4,152	3,179
0,625	7,255	5,095	3,795	2,900
0,6875	6,708	4,697	3,492	2,666
0,75	6,234	4,355	3,233	2,466
0,8125	5,820	4,058	3,001	2,293
0,875	5,455	3,798	2,813	2,143
0,9375	5,131	3,568	2,641	2,011
1	4,843	3,364	2,488	1,894

Fonte: AUTOR.

Tabela 18 – Torção por posição relativa nas pás NACA 6712 com TSR 5,6,7 e 8

Posição relativa (μ)	Torção TSR5(º)	Torção TSR6(º)	Torção TSR7(º)	Torção TSR8(º)
0	50,97	49,27	47,61	46,00
0,0625	41,11	38,08	35,32	32,83
0,125	33,36	29,90	26,97	24,48
0,1875	27,56	24,16	21,42	19,18
0,25	23,23	20,07	17,61	15,65
0,3125	19,96	17,08	14,89	13,17
0,375	17,43	14,82	12,86	11,34
0,4275	15,44	13,06	11,30	9,95
0,5	13,83	11,67	10,07	8,85
0,5625	12,52	10,53	9,07	7,96
0,625	11,42	9,59	8,25	7,24
0,6875	10,50	8,80	7,56	6,63
0,75	9,71	8,13	6,98	6,11
0,8125	9,02	7,55	6,48	5,67
0,875	8,43	7,04	6,04	5,28
0,9375	7,90	6,60	5,66	4,95
1	7,44	6,21	5,32	4,65

Fonte: AUTOR.

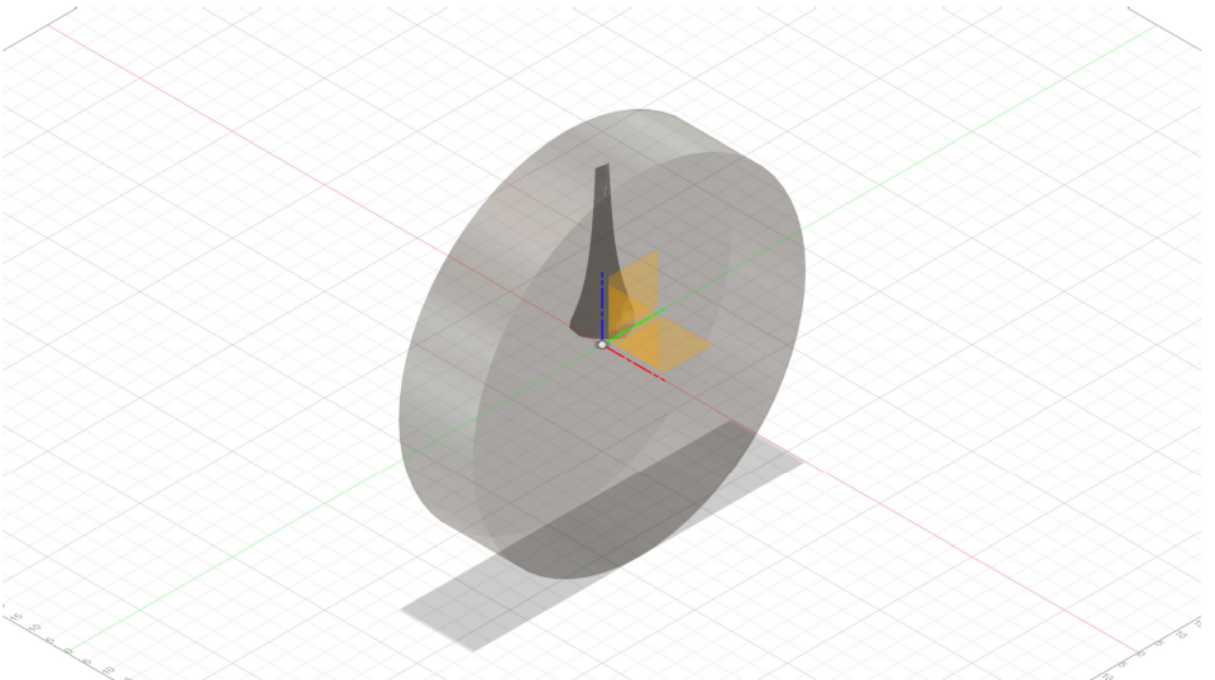
eixo z positivo e os cilindros têm suas bases no plano zy.

Tabela 19 – Dados do volume de controle rotativo das pás NACA 6712

Forma geométrica	Diâmetro da base	Altura
Cilindro	90m	20m

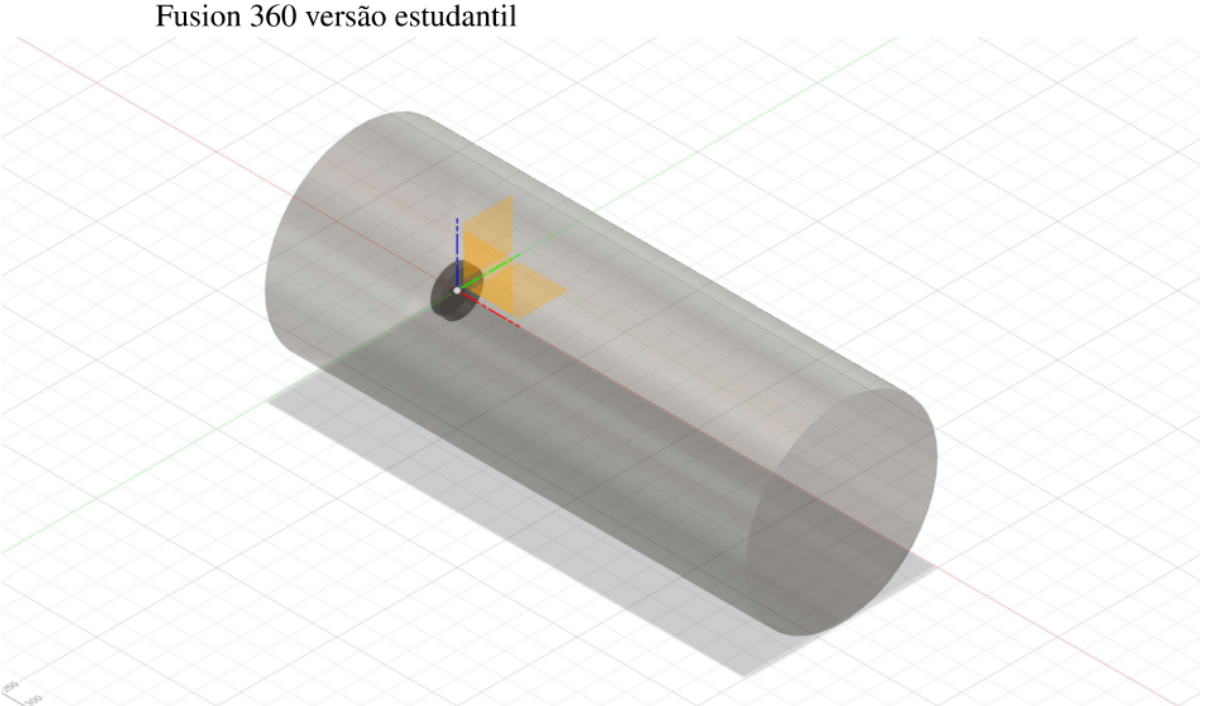
Fonte: AUTOR.

Figura 19 – Volume de controle rotativo que contém a pá NACA 6712 da turbina de eixo horiontal feito no software Fusion 360 versão estudantil



Fonte: AUTOR.

Figura 20 – Volume de controle fixo que contém o volume de controle rotativo feito no software Fusion 360 versão estudantil



Fonte: AUTOR.

4.2.2 Construção de malha

Após a definição do volume de controle, é necessária a construção da malha de simulação com a discretização da camada limite, do tamanho mínimo, médio e máximo no

Tabela 20 – Dados do volume de controle fixo que contém o volume de controle rotativo

Forma geométrica	Diâmetro da base	Altura	Razão de distância até as extremidades
Cilindro	400m	1000m	1:4

Fonte: AUTOR.

volume de controle. Foi feita, portanto, uma gestão de elementos para, primeiramente, capturar a camada limite e, depois, refinar o tanto quanto for possível o volume de controle como um todo.

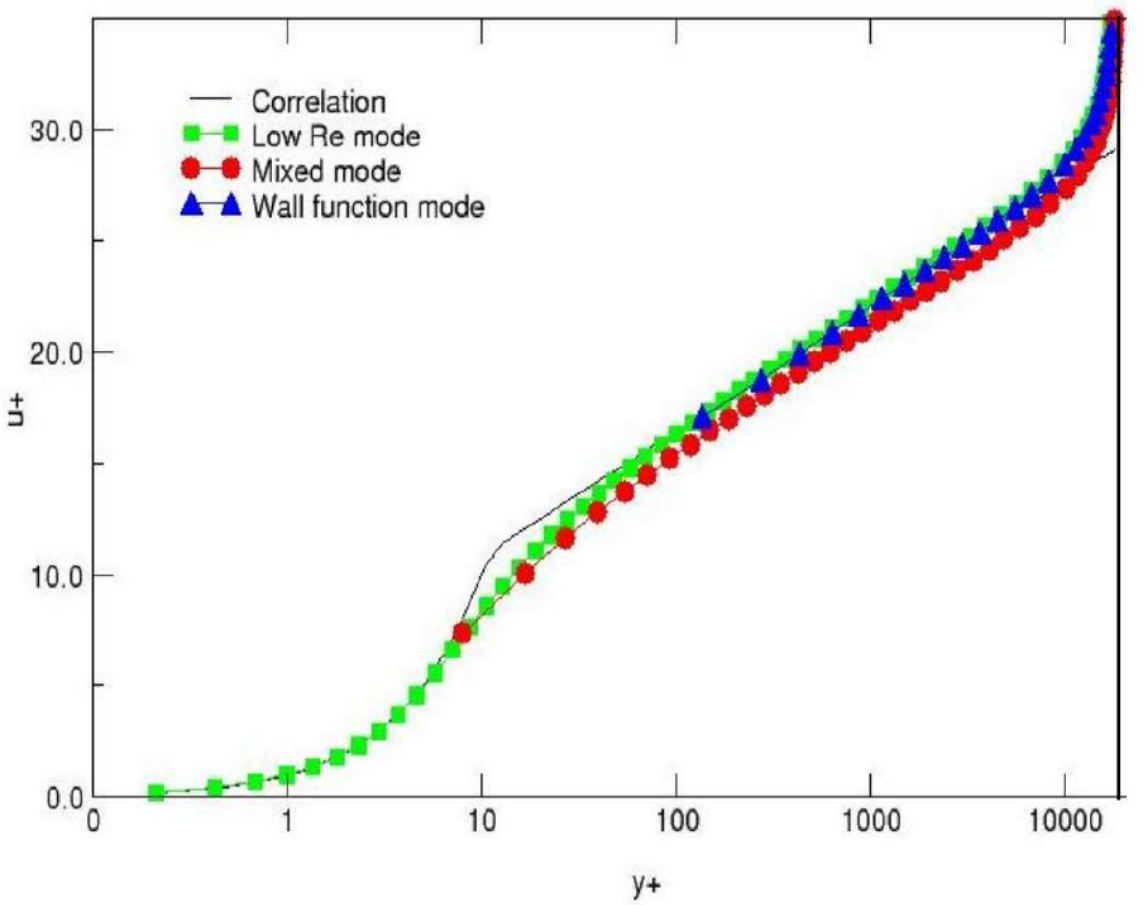
Para a camada limite, é necessário discretizar perto das condições de parede com uma proximidade suficientemente pequena, valor dado pela constante adimensional y plus que, para a resolução da camada limite precisaria ter o valor próximo de 1 para uma elevada qualidade, mas para utilizar uma função de parede ou modo misto pode ter valores entre 30 e 500 para o modelo turbulento RANS GEKO (Menter *et al.*, 2021), o qual, para aplicações em turbinas eólicas, é melhor que o k-ω SST (Kaviani e Moshfeghi, 2023), o qual geralmente apresenta uma melhor previsão de potência entre os modelos RANS desconsiderando o GEKO (Kabeel *et al.*, 2020). Estudos específicos de desempenho de pás eólicas de grande porte fizeram a comparação computacional de modelos RANS diferentes e também chegaram à conclusão de que o modelo GEKO supera o k-ω SST em aplicações de simulação de pás eólicas de eixo horizontal de grande porte, quando há controle dos coeficientes do modelo GEKO compatíveis com os perfis médios usados nas pás (Mauro *et al.*, 2025) (Marbouh e Elyamani, 2023).

Dado que, pela velocidade relativa, a maior parte da potência gerada por uma turbina é na região mais próxima da ponta, o y plus foi prioritariamente projetado para tal caso. Na ponta da pá de eixo horizontal, a corda tem um valor de aproximadamente 3,5 metros, com uma subdivisão de 200 partes circulando-a, ou seja, tal região da corda tem elementos de 3,5 cm de dimensão. Aplicando o cálculo do y plus para aproximadamente 30 obteve-se uma discretização que ainda permitiu o uso de mais elementos para o volume de controle como um todo.

Apesar de um TSR menor promover um maior coeficiente de potência em simulações BEM e aproximações iniciais, em condições operacionais, esse valor, para aerogeradores comerciais de grande porte, é bem maior, entre 9 e 12 (Moussavi e Ghaznavi, 2021). Portanto, foi feito um estudo ao modificar as cordas e os ângulos de torção das seções do perfil e, assim, encontrar uma turbina de maior eficiência, o NACA 6712 em uma turbina de eixo horizontal. Nesse caso, foi o perfil que teve o maior TSR simulado.

Para refinar suficientemente a malha na superfície dos elementos tridimensionais, a menor dimensão escolhida foi de 1mm e a maior de 10 metros, com a taxa de crescimento

Figura 21 – Tratamento do y plus perto da parede para modelo turbulentos RANS no ANSYS Fluent



Fonte: (Menter *et al.*, 2021)

de 1,2 como sugerido por (Ashwindran *et al.*, 2019), para capturar adequadamente as variações dimensionais ao longo da pá. Seguem essas informações de das principais condições superficiais da malha na Figura 21

Tabela 21 – Principais condições superficiais de malha

Menor dimensão	Maior dimensão	Taxa de crescimento
1mm	10m	1,2

Fonte: AUTOR.

A camada limite foi projetada de tal forma que atendesse à região y+ com, pelo menos, a função de parede de acordo com o modelo de turbulência GEKO; para tanto, foi feita uma discretização com 5 camadas e taxa de crescimento adequada na condição de parede delimitada pela pá eólica, assim como a taxa de transição da primeira camada, ou seja, a razão entre a altura da primeira camada das 5 criadas e a camada logo em cima dela. Portanto, seguem essas informações de discretização da camada limite na Figura 22.

Tabela 22 – Condições de discretização da camada limite no NACA 6712

Número de camadas	Taxa de transição da primeira camada	Taxa de crescimento
5	0,272	2,1

Fonte: AUTOR.

Para finalmente construir o volume de controle tridimensional, foi escolhida uma malha tipo poliédrica com comprimento máximo de 10 metros, assim como na malha superficial, e com taxa de crescimento suficientemente grande para os recursos computacionais disponíveis. A taxa de crescimento escolhida foi de 1,3. Seguem essas informações de condição de malha volumétrica na Figura 23

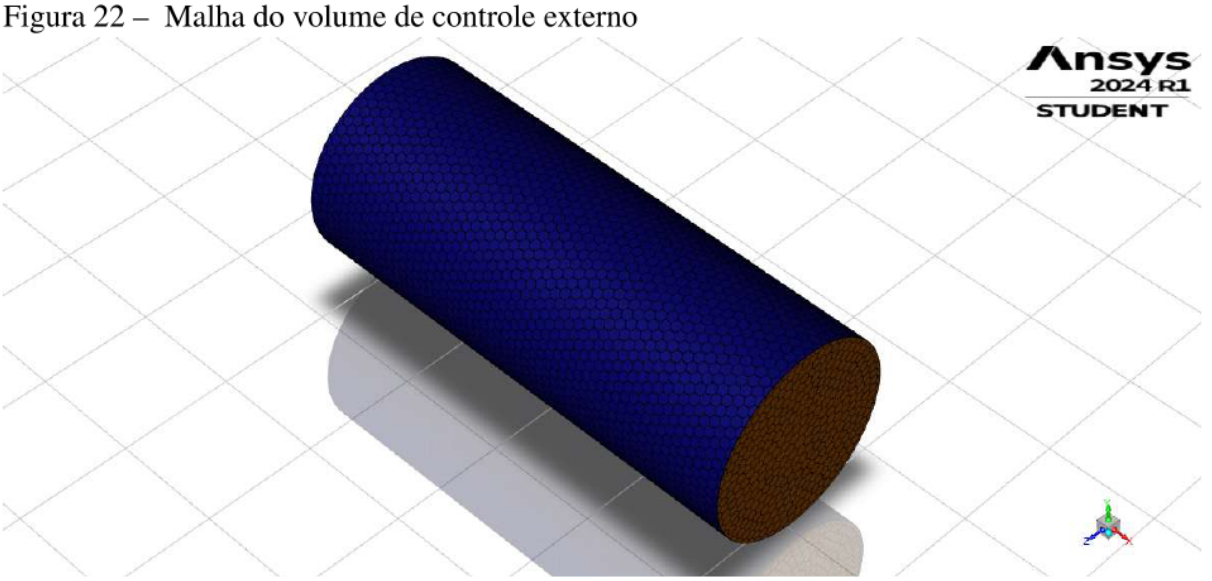
Tabela 23 – Condições da malha volumétrica NACA6712

Tipo de malha	Dimensão máxima	Taxa de crescimento
poliédrica	10m	1,3

Fonte: AUTOR.

Com as descrições das condições de malha, segue na Figura 22 o volume externo da malha sendo subdividido pelos elementos superficiais externos poliédricos para ilustrar a condição final de simulação da discretização das superfícies externas do volume de controle.

Figura 22 – Malha do volume de controle externo

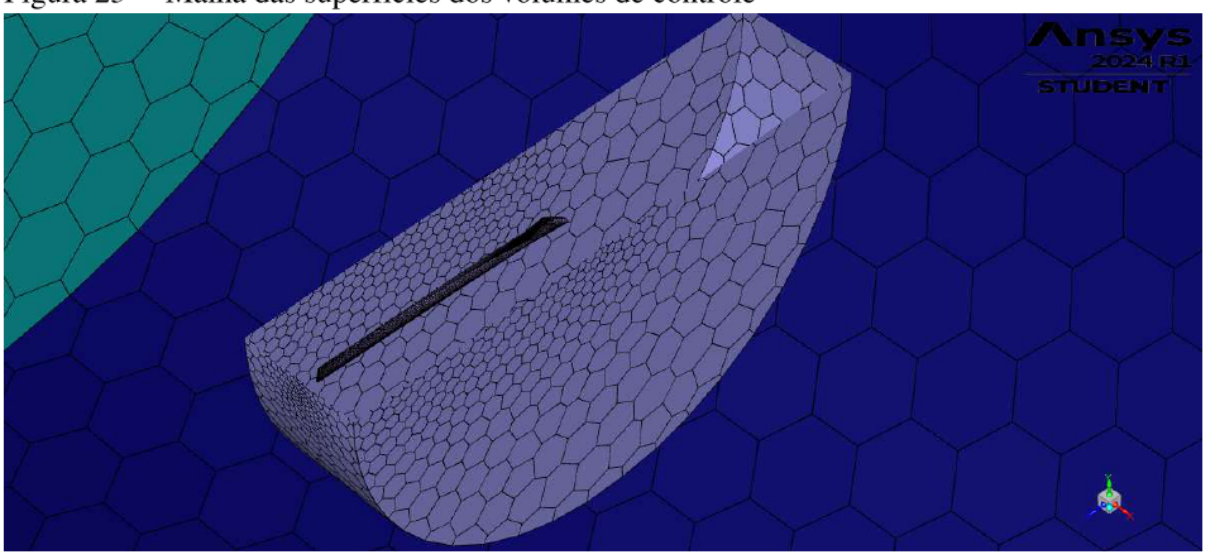


Fonte: AUTOR.

Dado que as superfícies externas já foram expostas, segue também, na Figura 23 as discretizações superficiais do volume de controle rotativo, assim como da pá em um corte longitudinal, expondo as dimensões relativas tanto dos elementos da pá em relação ao volume de

controle rotativo, quanto dos elementos do volume de controle rotativo com os elementos do volume de controle externo.

Figura 23 – Malha das superfícies dos volumes de controle



Fonte: AUTOR.

Para expor também a região de transição entre o volume de controle rotativo e o estático, segue na Figura 24, um corte também longitudinal na pá, mas, nesse caso, expondo também, os elementos de transição do volume de controle e deixando mais perceptível a influência da taxa de crescimento volumétrica dos elementos. Outra informação visual a ser exposta é a maior densidade de elementos de menor dimensão, tanto no bordo de ataque quanto no bordo de fuga, utilizados para melhor capturar os sutis efeitos de vorticidade e mudanças na velocidade do vento ao longo do perfil.

Na Figura 25, foi feito um corte para expor o perfil do NACA 6712 discretizado em conjunto com os elementos da malha tridimensional, buscando expor, principalmente, o efeito da taxa de crescimento volumétrico a partir de uma seção paralela a uma seção do perfil.

Na Figura 26, foi exposta uma imagem mais próxima do perfil e sem a coloração, como na Figura 25, pois o objetivo foi melhor expor a discretização da camada limite desde o bordo de ataque até o bordo de fuga.

4.2.3 Condições de simulação

A condição de simulação preliminar foi no regime estacionário, ou seja, uma solução não dependente do tempo, com uso da equação da energia e com o modelo de turbulência GEKO, amplamente utilizado em simulação de turbinas eólicas e cuja performance costuma superar o

Figura 24 – Visão em corte da malha no comprimento da pá



Fonte: AUTOR.

Figura 25 – Visão em corte da malha na seção do perfil da pá

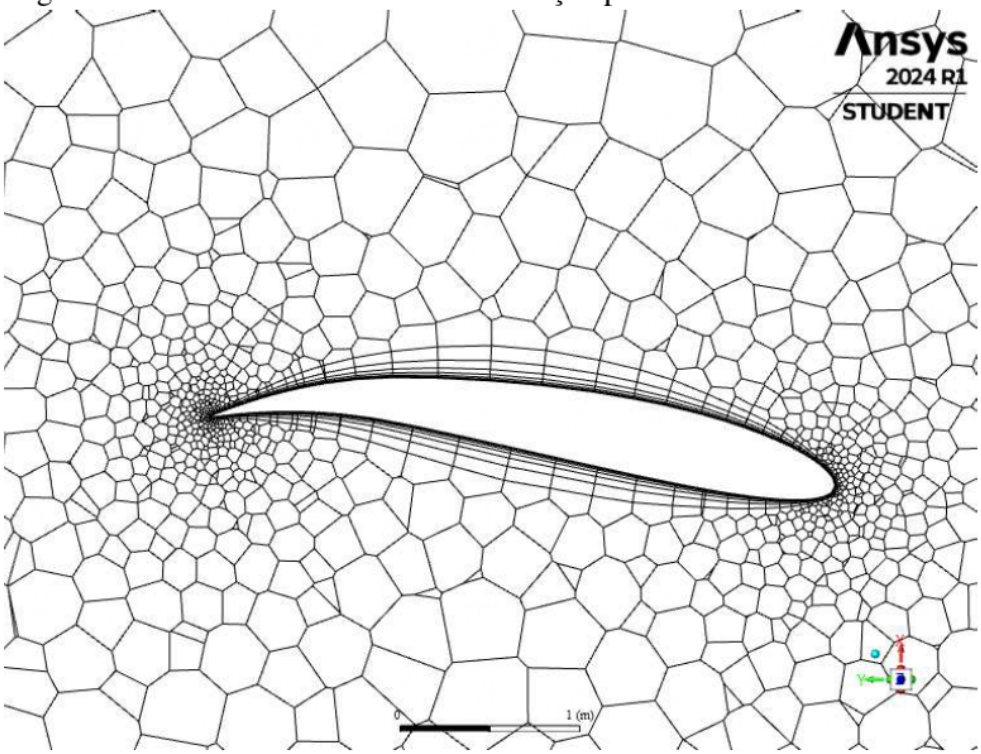


Fonte: AUTOR.

modelo k-ω SST, (Kaviani e Moshfeghi, 2023). Tais condições de simulação de pás eólicas de grande porte, comparando diferentes tipos de modelos RANS foram abordadas, por exemplo, em estudo como (Mauro *et al.*, 2025) e (Marbouh e Elyamani, 2023), e mostraram a superioridade do modelo GEKO quando ajustados os parâmetros de tal modelo. Nesse caso, o parâmetro modificado para atingir as médias de posição de descolamento da camada limite ao longo da pá foi o Csep, ou coeficiente de separação, que foi ajustado para 2.5 para se obter o ponto médio de separação da camada limite o mais próximo possível dos resultados experimentais (Abbott e Doenhoff, 2012).

O fluido simulado foi o ar, com condição de gás ideal e viscosidade dependente da temperatura, de acordo com a equação de Sutherland, exposta na equação 4.5, com o método de

Figura 26 – Visão em corte com discretização para camada limite



Fonte: AUTOR.

Tabela 24 – Condições preliminares de simulação

Condição temporal	Modelo de turbulência	$C_{sep} do modelo GEKO$
Estacionária	GEKO	2,5

Fonte: AUTOR.

três coeficientes.

$$\mu = \frac{C_1 T^{3/2}}{T + C_2} \tag{4.5}$$

Tabela 25 – Condições do fluido usado na simulação

Fluido	Modelo para a densidade	Modelo para a viscosidade
Ar	gás ideal	Sutherland de 3 coeficientes

Fonte: AUTOR.

A região do volume de controle rotativo foi configurada como movimento da malha centrada na origem e rotacionando em relação ao eixo x com velocidade angular de modo a promover TSR 5,6,7 e 8 sendo utilizada uma velocidade relativa que não promove movimento real para, assim, permitir a simulação em condição estacionária.

Para as condições de velocidade e turbulência, foi adotado como referência um

Tabela 26 – Condições do volume de controle rotativo das turbinas de eixo horizontal por TSR 5,6,7 e 8

TSR	Rotação rad/s	Centro de rotação	Eixo de rotação
5	1,19048	origem	x
6	1,42857	origem	x
7	1,66667	origem	x
8	1,90476	origem	x

Fonte: AUTOR.

estudo sobre uma pá rotativa, aproximando a intensidade turbulenta e o comprimento de escala turbulenta para uma casa decimal significativa, (Vita *et al.*, 2020).

Tabela 27 – Condições de velocidade e turbulência

Velocidade do vento	Intensidade turbulenta	Razão entre escala turbulenta e corda do perfil
10m/s	0,1 %	1

Fonte: AUTOR.

O método de resolução utilizado foi com acoplamento pressão-velocidade tipo PISO por sua elevada precisão em condições com volume de controle com referência inercial. O PISO é um algoritmo iterativo que resolve as equações diferenciais matriciais da condição-problema com o cálculo das velocidades para somente depois corrigir a pressão, e depois a velocidade, e assim sucessivamente até atingir o erro de iteração modelado (Blais *et al.*, 2016).

A discretização espacial foi do tipo Green-Gauss baseada em nó, a qual calcula as variações das variáveis nas faces das células, iniciando pelos nós, e recomendada para malhas não estruturadas (Radfar *et al.*, 2022).

A discretização espacial da pressão foi tipo PRESTO!, o qual consiste em uma interpolação específica para a variação de pressão nas faces das células, calculando nas faces o balanço de forças, o que permite maior qualidade e precisão em escoamentos com fortes gradientes de pressão e rotação (Tachos *et al.*, 2010).

As demais discretizações e parâmetros no espaço tipo QUICK, o qual faz uma interpolação quadrática, com dois pontos a montante e um a jusante, totalizando 3 pontos ao mesmo tempo, de alta ordem para termos de transporte de fluido, tal abordagem é recomendada para estruturas alinhadas com o escoamento, como nesse caso, e apresenta erro inerente menor quando comparada com métodos mais simples como o Upwind (Nguyen *et al.*, 2014).

A inicialização dos valores nas malhas foi com método híbrido. Na simulação, a condição de convergência foi de resíduo na continuidade menor que 1e-6, de k e ω menores que 1e-5, por serem valores naturalmente de maior oscilação, e os outros resíduos menores que 1e-6.

Tabela 28 – Condições de discretização e acoplamento pressão-velocidade

Tipo de acoplamento pressão-velocidade	Discretização espacial	Discretização de variáveis dependentes do espaço	Método pseudo-transiente
PISO	Green-Gauss baseada em nó	Pressão PRESTO e outras QUICK	off

Fonte: AUTOR.

A condição alvo de erro por interação no torque mensurado foi de 1e-6.

Tabela 29 – Resíduos alvo para as condições de convergência

Continuidade	k	ω	Toque
1e-6	1e-5	1e-5	1e-6

Fonte: AUTOR.

4.2.4 Geradores de Vórtex

O gerador de vórtex escolhido foi do tipo contrarrotativo, de acordo com a Figura 27, ou seja geradores de vórtex sequenciados em pares de aletas, onde, em relação a velocidade do vento incidente, os pares de aletas estão inclinadas em direções opostas e, portanto, criam vórtices que giram em sentidos opostos.

A escolha do gerador de vórtex foi pela sua simplicidade geométrica e alto ganho de sustentação, de acordo com (Lin *et al.*, 1994).

Tabela 30 – Descrição de pesquisa do VG

Pesquisadores	Sistema de teste	Tipo de estudo
(Lin *et al.*, 1994)	Perfil aerodinâmico	Túnel de vento

Fonte: AUTOR.

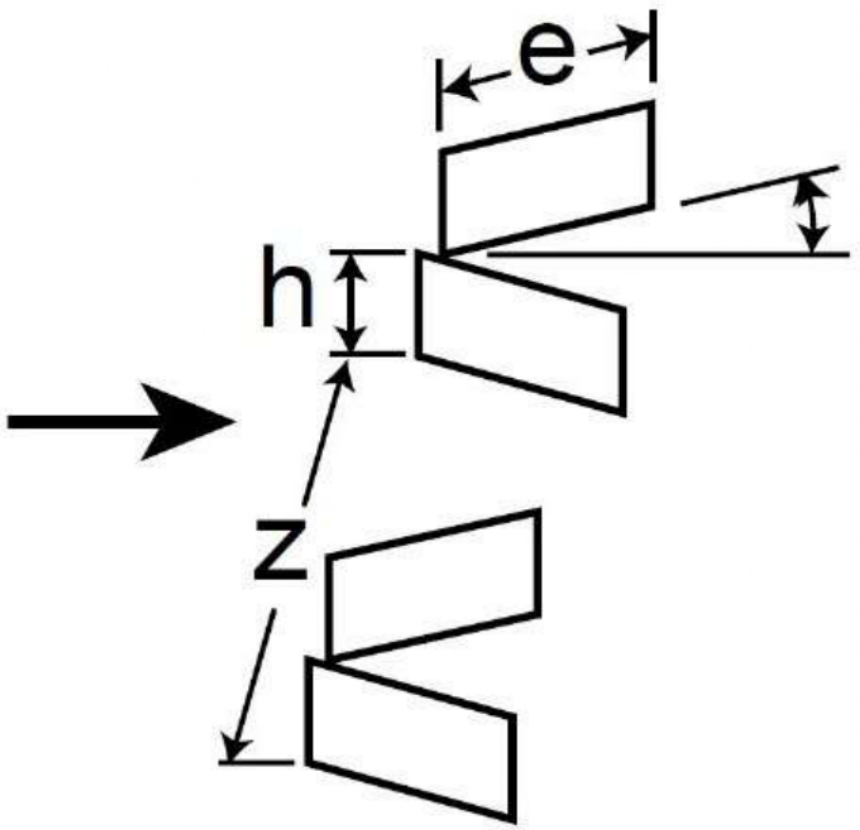
Tabela 31 – Parâmetros geométricos do VG

h	e/h	Δz/h	β (graus)	Posição do VG
0,2δ	7	13	$\pm$23	30h a montante do descolamento

Fonte: AUTOR.

O descolamento da camada limite foi simulado com o software XFoil contido no programa QBlade. Os locais dos posicionamentos dos geradores de vórtex de acordo com (Lin *et al.*, 1994), ou seja, a uma distância a montante de 6 vezes a espessura da camada limite no ponto de descolamento, que equivale a 30 vezes a altura do VG, que é 5 vezes menor que a altura

Figura 27 – Modelo do gerador de vórtex adotado



Fonte: (Lin, 2002)

da camada limite no ponto de descolamento, aproximados para a fração de corda até o bordo de fuga do perfil e fração radial, a qual foi posicionada após a região afetada pela turbulência de ponta da pá, seguem as posições ótimas com as posições relativas expostas na Tabela 32, sendo aproximadas para o vértice mais próximo do modelo tridimensional ao ponto de otimização:

Tabela 32 – Posições ótimas dos geradores de vórtex por TSR

TSR	Posição relativa na corda (ν)	Posição relativa radial (μ)	Altura do VG (mm)
5	0,1950	0,0596	2
6	0,1264	0.0596	3
7	0,1264	0.0596	3
8	0,1264	0.0596	3

Fonte: AUTOR.

Após a simulação das pás sem os geradores de vórtex, eles foram adicionados à geometria das pás percorrendo a raiz da pá e cobrindo uma região de aproximadamente 10% da pá assim como foi utilizado em (Martínez-Filgueira *et al.*, 2017). A teoria de geradores de vórtex pode ser baseada em vários parâmetros, este trabalho adotou a teoria de (Lin *et al.*, 1994) para modelar os VGs com base na espessura da camada limite, tanto porque o software QBlade

permite tal estimativa, quanto porque foi obtido um ganho de sustentação de 10 % (Lin, 2002). Para simplificar a geometria dos VG, os valores de altura foram arredondados para o inteiro mais próximo em milímetros, e posicionados com referência aos vértices que descrevem a geometria da pá, a fim de manter as condições de proporcionalidade entre as pás, dado que todas elas têm a mesma quantidade de pontos discretizando a corda. Para uma análise de validação do posicionamento dos VGs, a posição dos geradores de vórtex foi modificada em relação à posição prevista em (Lin *et al.*, 1994) para outros dois vértices, um logo após o vértice ótimo e outro logo a frente, e os torques foram simulados e comparados, seguem as posições relativas na Tabela 33 .

Tabela 33 – Posições escolhidas para posicionamento dos geradores de vórtex para validação de posicionamento

Posição relativa na corda (v)
0,07
0,1264
0,1950

Fonte: AUTOR.

O posicionamento dos VGs na direção radial e na corda corresponde a vértices específicos. Na direção radial, está a 5 vértices de distância da extremidade da pá; na direção da corda, estão a 5, 7 e 9 vértices de distância, ou seja, como dito no parágrafo anterior, foram posicionados novos VGs nos vértices mais próximos ao do vértice de posição ótima e, em termos de posição relativa, eles ficaram nas posições expostas na Tabela 33, mas, em termos de distância, em vértices, da extremidade da pá, eles ficaram a 5, 7 e 8 vértices de distância.

5 RESULTADOS

Primeiramente, seguem os resultados pela metodologia BEM, com CFD sem geradores de vórtex e com geradores de vórtex em diferentes posições para os perfis NACA6712 em diferentes TSR. A posição do VG será definida com a fração da corda até o bordo de fuga. ND faz referência a um resultado quando não definido. Os resultados da Tabela 34 mostram que as posições ótimas previstas para os geradores de vórtex são, de fato, as de maior potência fornecida. A metodologia BEM apresentou maior potência prevista nos casos de TSR 5 e 6 em relação aos por CFD, mas com TSR 7 apresentou potência prevista menor que a de CFD. Dentre todas as geometrias para cada TSR, a com maior potência, excluindo o TSR 7, foi o TSR 6 com gerador de vórtex na posição ótima prevista. O número de elementos aumentou com o aumento do TSR e com a adição do gerador de vórtex. O termo Erro faz referência ao erro de iteração máximo nas últimas 20 iterações referentes ao torque dado que o critério de convergência foi atingido.

Tabela 34 – Torque e número de elementos dos perfis NACA6712

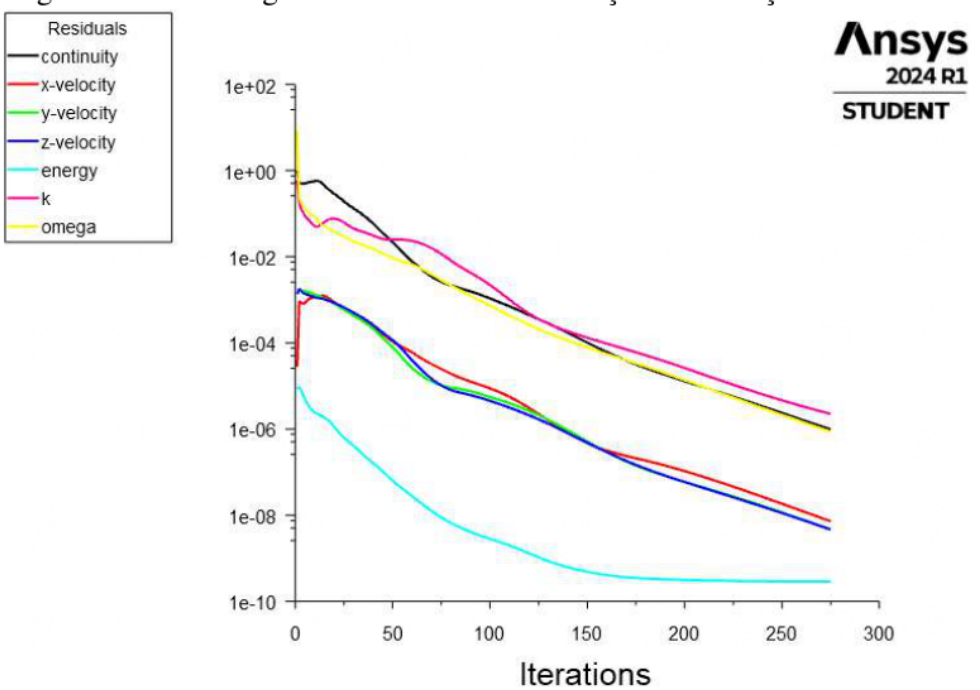
TSR	Metodologia	Posição VG (v)	Torque (Nm)	Erro (Nm)	Número de elementos	Potência(MW)
5	BEM	ND	809300	ND	ND	1,9269
5	CFD	ND	694448	0,6	3640407	1,6535
5	CFD	0,1950	699044	28,4	5597773	1,6644
5	CFD	0,1264	703681	0,002	5667758	1,6754
5	CFD	0,07	699430	0,005	5715200	1,6653
6	BEM	ND	672000	ND	ND	1,9200
6	CFD	ND	653267	0,6	3109966	1,8665
6	CFD	0,1950	646648	0,5	908489	1,8476
6	CFD	0,1264	646455	0,8	903550	1,8470
6	CFD	0,07	646242	0,9	908101	1,8464
7	BEM	ND	573000	ND	ND	1,9100
7	CFD	ND	597048	0,5	2779405	1,9902
7	CFD	0,1950	597180	0,004	4076732	1,9906
7	CFD	0,1264	605117	0,008	4094158	2,0171
7	CFD	0,07	596192	0,005	4096608	1,9873
8	BEM	ND	495863	ND	ND	1,8890
8	CFD	ND	520406	1,6	2646770	1,9825
8	CFD	0,1950	525933	0,003	3960431	2,0036
8	CFD	0,1264	526422	0,002	3957873	2,0054
8	CFD	0,07	525657	0,02	3968812	2,0025

Fonte: AUTOR.

Para os valores subsequentes terem valia, os resíduos precisam ter atingido os valores propostos. Seguem então os resíduos da simulação em função das iterações na Figura 28. Os gráficos de resíduos foram todos semelhantes, portanto será exposto somente um gráfico que expõe os resíduos numéricos das principais variáveis de simulação, a continuidade, as velocidades

em cada eixo, a energia, o k e o ω, em que o critério de convergência principal adotado foi o de o resíduo de continuidade atingir 1 sobre 1 milhão.

Figura 28 – Convergência dos resíduos em função das iterações

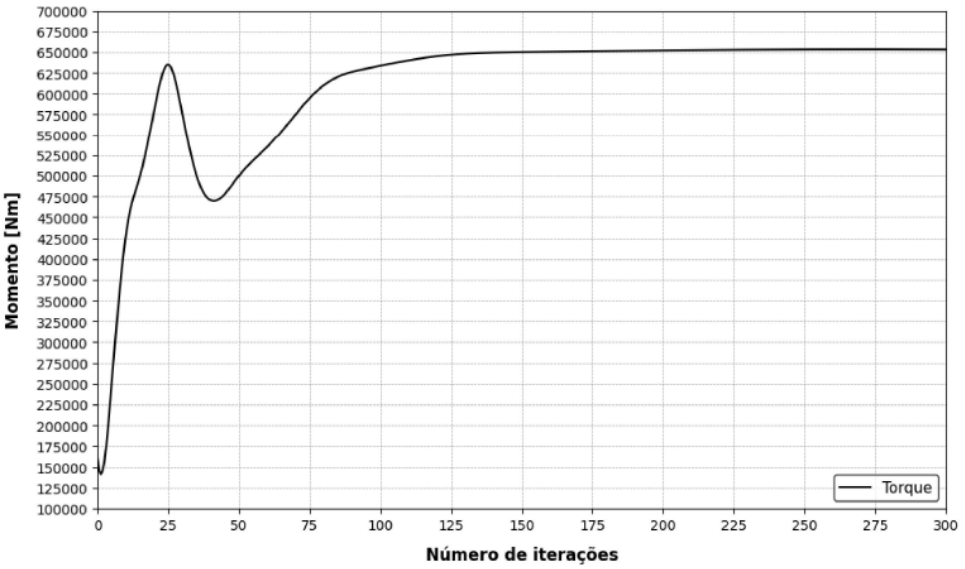


Fonte: AUTOR.

Para a previsão do torque ter sido válida, ela tem de ter convergido para um valor esperado, pouco abaixo do valor previsto pela teoria BEM, fato este que ocorreu, como na Figura 29 para TSR6 sem VG. O comportamento do torque em função do número de iterações foi similar em todos os casos, por isso, apenas esse caso será exposto. Em alguns dos casos, como o exposto na Figura 29, houve convergência em menos de 300 iterações, mas houve convergências que levaram até cerca de 1000 iterações.

A convergência em função do número de iterações apresenta um comportamento de aumento de torque inicial, para posterior queda e, finalmente, aumento até a convergência. Tal evento ocorre, pois, no início, na primeira iteração, o torque resulta somente da rotação e não do escoamento incidente, o que causa o momento inicial positivo. À medida que as primeiras iterações ocorrem, o escoamento incidente aumenta o torque pela variação do ângulo de ataque, causando a primeira subida de torque; todavia, o escoamento começa a gerar vórtex muito fortes e se reorientar para tomar direções coerentes com o escoamento externo, isso causa a queda de torque seguinte, entretanto, essas variações de vorticidade e aumentos de turbulência são amenizadas à medida que mais iterações ocorrem, causando o segundo aumento de torque até

Figura 29 – Convergência do torque em função das iterações



Fonte: AUTOR.

a convergência, tal efeito é coerente com o previsto pela teoria do solver do ANSYS Fluent e, portanto, é um comportamento esperado (ANSYS, 2024).

O modelo GEKO apresenta validade prevista dentro da faixa de y+ com função de parede definida e validada, como sendo menor que 1 até alguns milhares, adaptando automaticamente o modelo de y+ utilizado. Portanto, segue o resultado do y+ médio na Figura 35 ao longo da pá para validar a discretização da malha escolhida com modo misto.

Tabela 35 – Valores de y+ médio nas simulações

TSR	Posição VG (v)	y+ médio
5	ND	30,4
5	0,1950	30,4
5	0,1264	30,4
5	0,07	30,4
6	ND	34,8
6	0,1950	34,8
6	0,1264	34,8
6	0,07	34,8
7	ND	38,5
7	0,1950	38,5
7	0,1264	38,5
7	0,07	38,5
8	ND	42,0
8	0,1950	42,0
8	0,1264	42,0
8	0,07	42,0

Fonte: AUTOR.

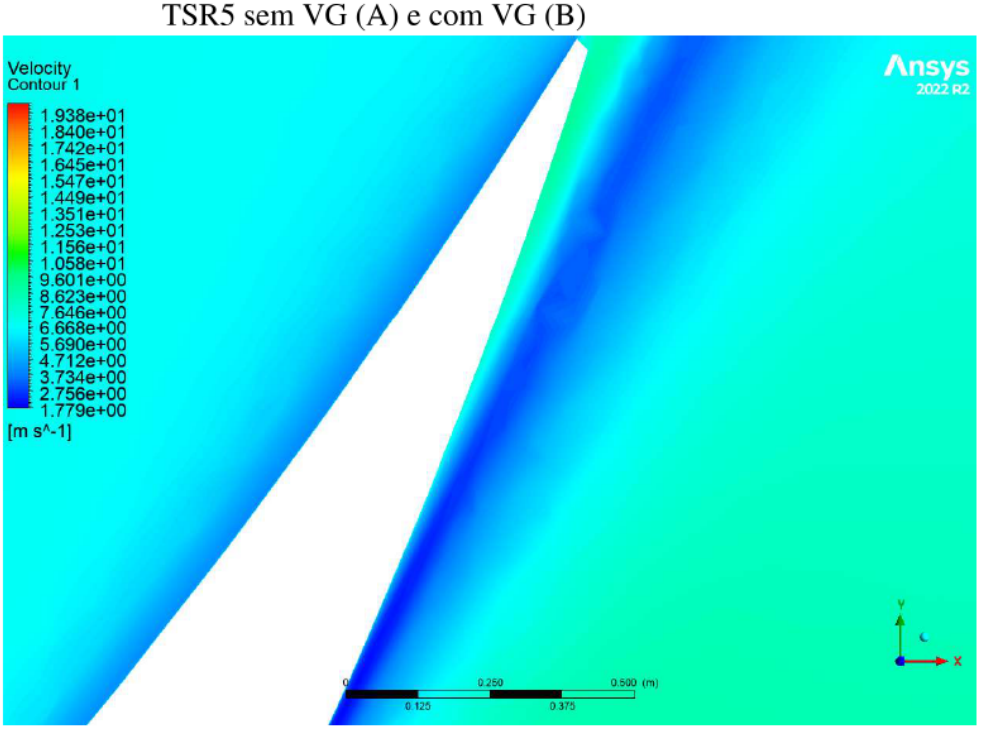
Os valores de y+ médio aumentaram com o aumento do TSP, mas não com a adição

dos geradores de vórtex. O crescimento do y+ com o TSR ocorreu de forma linear, com coeficiente angular valendo 3,85, mostrando razoável sensibilidade com as dimensões da pá projetada, assim como também com a velocidade de rotação. O valor médio do y+ em todas as pás foi de 36,4.

A pá com TSR 5 tem o ponto de descolamento da camada limite próximo ao previsto pelo software XFoil, a pá com TSR 6 tem o descolamento bem mais prematuro que todos os outros casos e as pás com TSR 7 e 8 têm o ponto de descolamento posterior ao previsto pelo software XFoil.

Na simulação CFD da pá com VG, o descolamento da camada limite ocorre mais próximo ao bordo de fuga em todos os casos, excluindo a pá com TSR 6, A região de descolamento da camada limite é menor à medida que o TSR aumenta de 6 até 8.

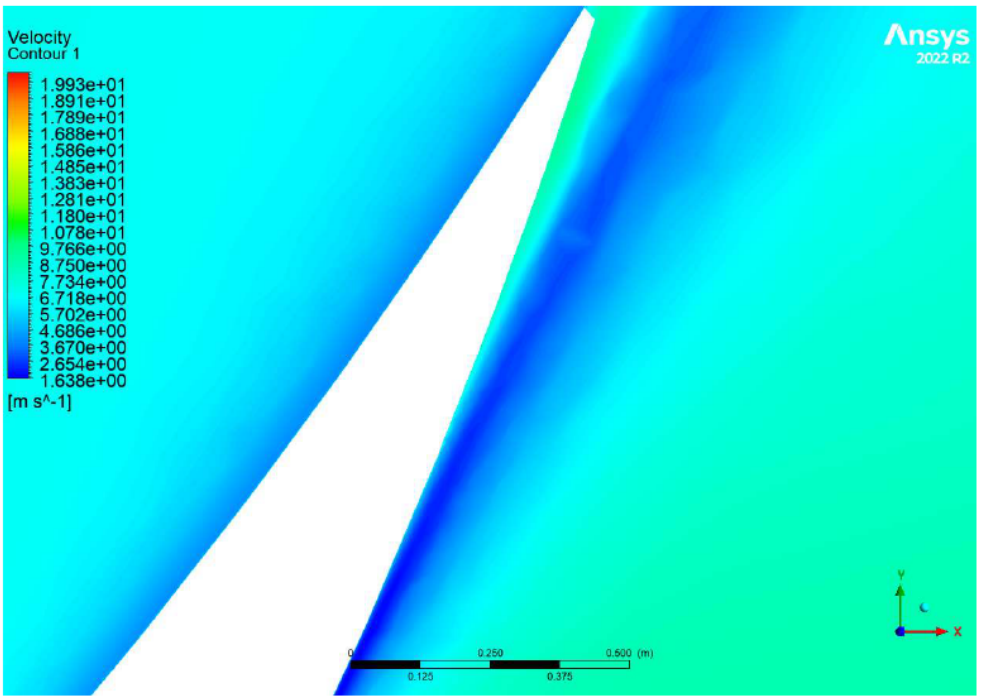
Figura 30 – Velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR5 sem VG (A) e com VG (B)



A

Fonte: AUTOR.

A camada limite, na região de baixa velocidade, em azul escuro e azul claro, houve uma redução da sua distância média do caso de TSR 5 sem VG para o caso com VG, fato esse que externaliza o resultado obtido, no qual, no TSR 5 houve ganho de potência devido a adição dos geradores de vórtex em todas as posições relativas testadas, com o maior ganho ocorrendo exatamente no vértice mais próximo ao do ponto ótimo previsto pela teoria utilizada.

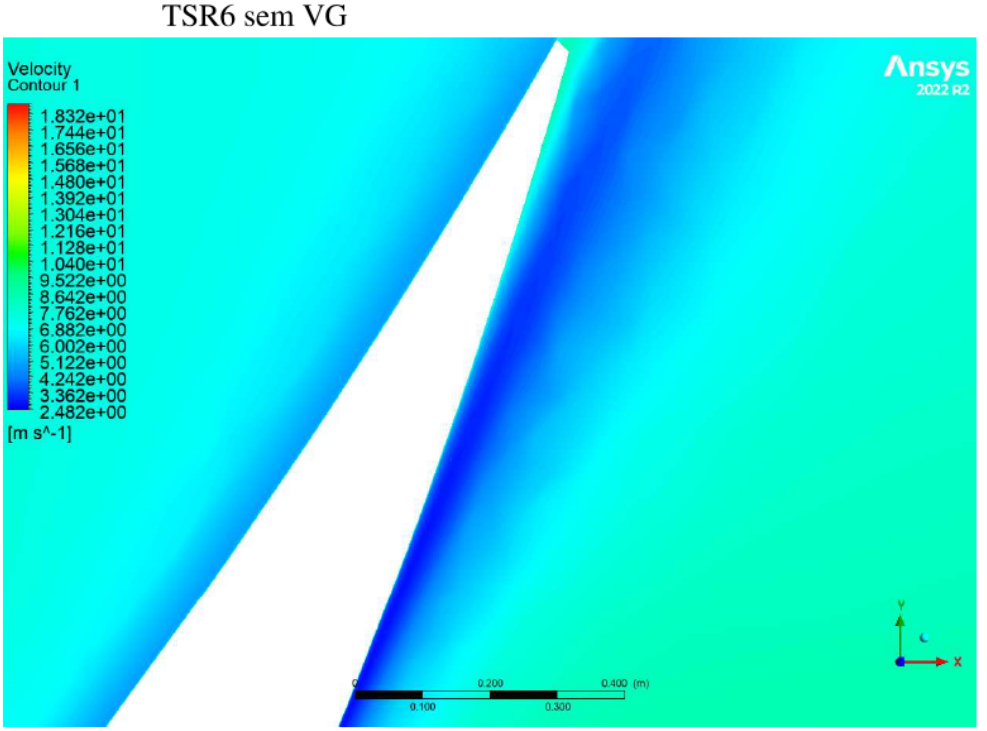


B

Fonte: AUTOR.

Tais resultados colaboram com a teoria prevista tanto no ganho de potência quanto no ponto ótimo de posicionamento do VG. O ponto de descolamento também foi bastante próximo do previsto pelo software xfoil, colaborando com o resultado obtido.

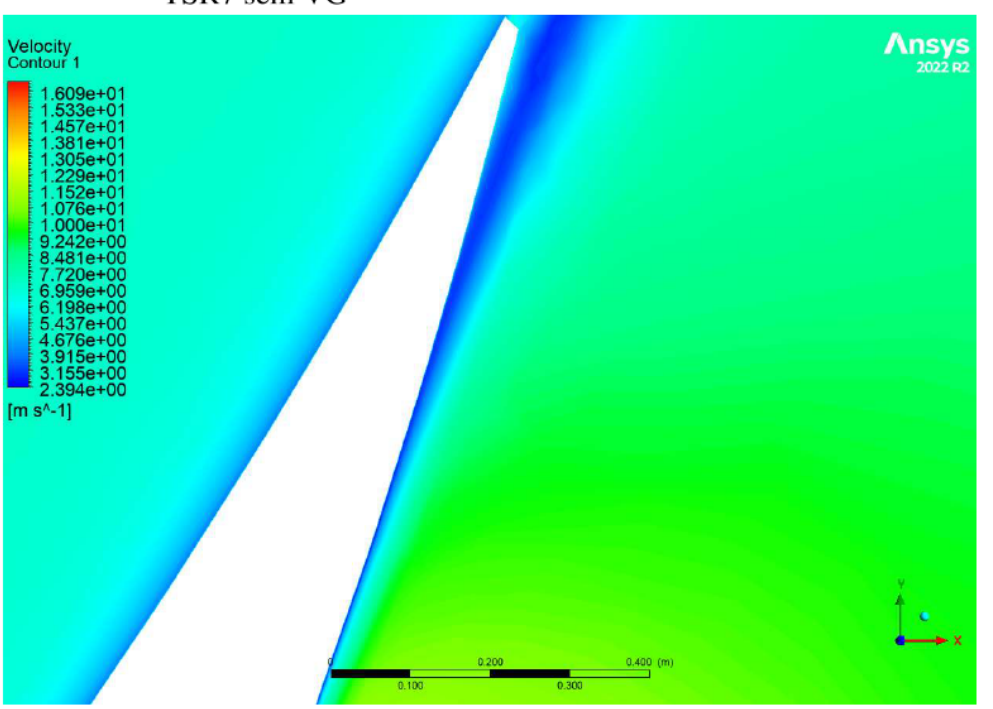
Figura 31 – Velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR6 sem VG



Fonte: AUTOR.

Com o aumento do TSR era esperada a redução da espessura da camada limite; entretanto, na simulação da pá projetada para o TSR 6 a espessura da camada limite foi maior até mesmo que na pá projetada para TSR 5. Tal aumento de espessura da camada limite, por outro lado, também veio acompanhado de uma redução na região de recirculação no bordo de fuga da pá de cor verde clara, sugerindo que o efeito da redução da zona de recirculação foi mais benéfico para a potência final que o aumento da espessura da camada limite. Tais alterações da espessura da camada limite e zona de recirculação, todavia, provocaram uma estimativa errada da posição ótima dos geradores de vórtex, causando uma redução da potência final produzida com a adição dos geradores de vórtex usando da teoria abordada.

Figura 32 – Velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR7 sem VG

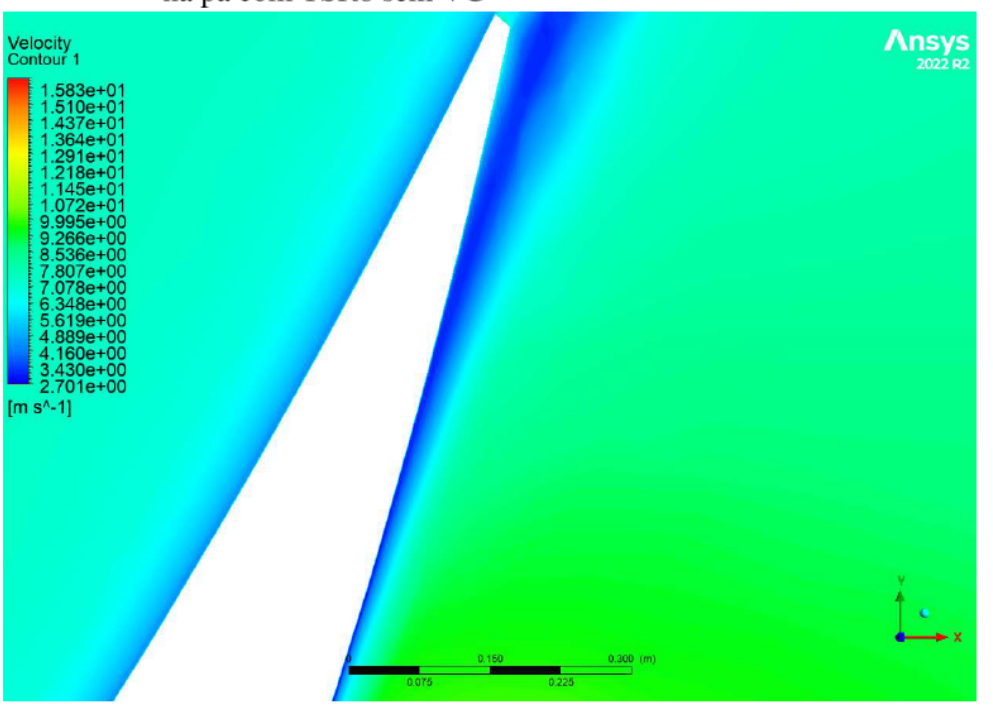


Fonte: AUTOR.

O perfil de velocidade na pá projetada para TSR 7 mostra o esperado, com a redução da camada limite em relação tanto à pá com TSR5 quanto à pá com TSR 6. Ademais, houve também a redução da zona de recirculação no bordo de fuga, fatos esses que aumentaram o desempenho desse modelo, além de ter a espessura da camada limite e região de separação próximas da prevista pelo xfoil, diferente do que ocorreu com o TSR6. Assim como no TSR5, houve aumento da potência simulada em todos os casos com VG em relação ao simulado sem VG, ocorrendo também no mesmo vértice previsto para ser o ponto de otimização posicional. Colaborando com o modelo de VG adotado tanto para ganho de potência quanto para posição

relativa ótima de posicionamento do VG.

Figura 33 – Perfil de velocidade próximo ao descolamento da camada limite na pá com TSR8 sem VG



Fonte: AUTOR.

Similar ao que aconteceu com o TSR5 e depois com o TS6, no TSR8, a camada limite foi mais espessa que na pá com TSR7, mas com diferenças significativas, pois, nesse caso, não houve mudança significativa na região de recirculação, fato esse que contribuiu para a potência final da pá com TSR8 ser menor que na pá com TSR7. Outro evento que ocorreu com a pá projetada para TSR8 foi que a presença do VG aumentou a potência em todos os casos em relação ao caso sem VG, assim como a posição relativa ótima foi mantida a mesma que nos casos das pás com TSR7 e TSR5.

Segue a Tabela 36 com o ganho percentual de torque e cada configuração de TSR e ν analisadas.

Os ganhos percentuais de torque e os valores dos coeficientes de potência apontaram para, de fato, o ganho de potência devido ao VG, e ao ganho máximo quando posicionado na posição relativa ótima, a não ser no caso do TSR6, em que a espessura da camada limite foi bastante acima da prevista, acarretando em um posicionamento que não somente não foi otimizado, mas também causou prejuízo na potência final fornecida.

Os valores dos coeficientes de potência foram muito acima dos esperados para uma turbina eólica real, mas, devido às condições de baixa turbulência incidente e ao fato de a análise

Tabela 36 – Ganho percentual de torque e valores de Cp para NACA6712

TSR	Posição VG (v)	Ganho (%)	Cp
5	ND	0	0,4871
5	0,1950	0,66	0,4903
5	0,1264	1,33	0,4936
5	0,07	0,72	0,4906
6	ND	0	0,5499
6	0,1950	-1,01	0,5443
6	0,1264	-1,04	0,5442
6	0,07	-1,07	0,5442
7	ND	0	0,5864
7	0,1950	0,02	0,5864
7	0,1264	1,35	0,5910
7	0,07	-0,15	0,5855
8	ND	0	0,5841
8	0,1950	1,01	0,5896
8	0,1264	1,16	0,5902
8	0,07	1,01	0,5892

Fonte: AUTOR.

ser comparativa entre os casos com e sem VG, os percentuais de ganho de potência máximo foram coerentes com os valores esperados.

6 CONCLUSÕES

Finalmente, a pá eólica projetada com VG, de fato, sugeriu um ganho de potência quando comparada com a mesma pá sem o VG.

A predição de potência da pá pelo modelo BEM é geralmente mais otimista que a por CFD utilizando RANS no regime permanente em relação à potência prevista (Hasan *et al.*, 2017). Tal evento também ocorreu nestas simulações, assim como pode ser observado na tabela 34, com exceção das pás com TSR 7 e TSR 8. Esse fato pode ter ocorrido devido ao modelamento BEM utilizado, o qual previu a potência utilizando um único conjunto de curvas de sustentação e arrasto por ângulo de ataque para cada TSR e, consequentemente, para valores maiores de TSR, o erro devido à não uniformidade da curva de arrasto e sustentação ao longo da pá proporciona uma redução na potência prevista por tal método, possibilitando uma simulação CFD apresentar valor de potência superior ao modelo BEM. A simulação realizada foi feita com apenas uma pá e com a potência sendo duplicada. Tal fato aumenta a potência efetiva da turbina, afinal, o efeito da turbulência parasita que a primeira pá causa na segunda foi negligenciado e, portanto, favoreceu um maior valor de potência para a simulação CFD.

Conclui-se que a adição de geradores de vórtex, segundo a modelagem adotada, aumenta o torque final fornecido pela pá, com o posicionamento do VG também influenciando o desempenho final. A metodologia BEM conseguiu prever com erro não superior a 15 % do torque e da potência em relação à simulação CFD, como exposto em 34.

A posição ótima do gerador de vórtex em cada TSR foi de acordo com a teoria proposta por (Lin, 2002) adotada, com exceção do TSR6. Apesar da região de descolamento da camada limite ser maior no TSR 6, o ganho relativo de torque e, consequentemente, potência, é maior com TSR 7, tal evento pode ser justificado pela drástica redução do efeito de esteira autoinduzido pela pá eólica, pois à medida que o TSR aumenta, apesar da velocidade relativa aumentar, o que aumeta o coeficiente de sustentação e consequentemente o torque fornecido, também aumenta o efeito de esteira e o tempo de espera de uma pá para sofrer o efeito da esteira aumenta (Vermeer *et al.*, 2003). Logo, nesse caso, com TSR 7 o ganho devido a redução do efeito de esteira foi maior que o da redução da camada limite.

O valor máximo de potência foi de 1,35 %, valor muito próximo do previsto pela modelagem de (Martínez-Filgueira *et al.*, 2017), que foi similar a esse estudo.

O único caso no qual houve perda de potência foi com o TSR 6, no qual o descolamento da camada limite ocorreu bem antes do previsto e, portanto, o posicionamento previsto

dos VGs não foi coerente com o real, dessa forma, a adição de VGs promoveu mais arrasto e, portanto, causou a perda de potência na pá.

No TSR 6 a proximidade dos VGs da região a jusante promoveu a redução da perda energética, comportamento aparentemente incoerente com fato que a proximidade da região de descolamento da camada limite energiza mais tal camada e, assim, deveria reduzir a perda energética, por outro lado, pode-se perceber a ocorrência de uma região separada e com possível recirculação a jusante do perfil, a qual pode ser mitigada com a proximidade dos geradores de vórtex e portanto, causar uma redução da perda energética maior que a perda do efeito na camada limite.

O objetivo principal de comparar a potência fornecida por um gerador eólico com duas pás, com e sem a adição de geradores de vórtex, foi, finalmente, cumprido, como exposto nas tabelas 34 e 36.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, I. H.; DOENHOFF, A. E. V. **Theory of wing sections**: including a summary of airfoil data. [S. l.]: Courier Corporation, 2012.

AHMED, H. E.; MOHAMMED, H. A.; YUSOFF, M. Z. An overview on heat transfer augmentation using vortex generators and nanofluids: Approaches and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5951–5993, 2012.

AJAO, K. R.; MAHAMOOD, M. R. Wind energy conversion system: The past, the present and the prospect. **Journal of American Science**, Citeseer, v. 5, n. 6, p. 17–22, 2009.

ALKABIE, H. Design methods of the abb alstom power gas turbine dry low emission combustion system. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 214, n. 4, p. 293–315, 2000.

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide, Release 2024 R1**. Canonsburg, PA, USA, 2024. Disponível em: https://www.ansys.com. Acesso em: 30 jun. 2024.

ARAÚJO, M. S. M. D.; FREITAS, M. A. V. de. Acceptance of renewable energy innovation in brazil—case study of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 12, n. 2, p. 584–591, 2008.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

ASHWINDRAN, S.; AZIZUDDIN, A.; OUMER, A. Computational fluid dynamic (cfd) of vertical-axis wind turbine: mesh and time-step sensitivity study. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, v. 13, n. 3, p. 5604–5624, 2019.

ASLI, M.; GHOLAMALI, B. M.; TOUSI, A. M. Numerical analysis of wind turbine airfoil aerodynamic performance with leading edge bump. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, p. 1–8, 2015.

ASSIREU, A. T.; FISCH, G.; CARVALHO, V. S.; PIMENTA, F. M.; FREITAS, R. M. de; SAAVEDRA, O. R.; NETO, F. L.; JÚNIOR, A. R.; OLIVEIRA, D. Q.; LOPES, D. C. *et al.* Sea breeze-driven effects on wind down-ramps: Their implications for wind farms along the north-east coast of brazil. **Energy**, Elsevier, p. 130804, 2024.

BAETS, G. D.; SZABO, A.; NAGY, P. T.; PAAL, G.; VANIERSCHOT, M. Vortex characterization and parametric study of miniature vortex generators and their near-field boundary layer effects. **Applied Sciences**, v. 14, n. 16, p. 6966, 2024.

BALIJEPALLI, R.; CHANDRAMOHAN, V.; KIRANKUMAR, K. Optimized design and performance parameters for wind turbine blades of a solar updraft tower (sut) plant using theories of schmitz and aerodynamics forces. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Elsevier, v. 30, p. 192–200, 2018.

BALLERSTEIN, N.; HORST, P. Manipulation of the aerodynamic behavior of the drivaer model using dimple patterns. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 233, p. 105216, 2023.

BANGGA, G. Comparison of blade element method and cfd simulations of a 10 mw wind turbine. **Fluids**, MDPI, v. 3, n. 4, p. 73, 2018.

BINGHAM, G. J.; NOONAN, K. W. **Low speed aerodynamic characteristics of NACA 6716 and NACA 4416 airfoils with 35 percent-chord single-slotted flaps**. [S.l.], 1974.

BLAIS, B.; LASSAIGNE, M.; GONIVA, C.; FRADETTE, L.; BERTRAND, F. A semi-implicit immersed boundary method and its application to viscous mixing. **Computers & Chemical Engineering**, Elsevier, v. 85, p. 136–146, 2016.

BLOXHAM, M. J.; BONS, J. P. A global approach to turbomachinery flow control: Passage vortex control. **Journal of Turbomachinery**, v. 136, n. 4, 2014.

BOOKER, C. D.; ZHANG, X.; CHERNYSHENKO, S. I. Large-scale vortex generation modeling. **Journal of Fluids Engineering**, v. 133, n. 12, 2011.

BOUDERBALA, F. Passive flow control around a naca4415 airfoil by means of vortex generators. **International Journal of Fluid Mechanics Research**, v. 52, n. 1, p. 1–16, 2025.

BOUSSINESQ, J. **Essai sur la théorie des eaux courantes**. [S.l.]: Imprimerie nationale, 1877.

BRANLARD, E. **Wind turbine aerodynamics and vorticity-based methods**: Fundamentals and recent applications. [S. l.]: Springer, 2017.

CHEN, L.; WU, J.; CHENG, B. Leading-edge vortex formation and transient lift generation on a revolving wing at low reynolds number. **Aerospace Science and Technology**, v. 97, p. 105589, 2020.

CHEN, M.; ZHAO, Z.; LIU, H.; WANG, T.; MENG, L.; FENG, J.; JIANG, R.; WANG, D. Research on the parametric modelling approach of vortex generator on wind turbine airfoil. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, 2021.

CHILLON, S.; URIARTE-URIARTE, A.; ARAMENDIA, I.; MARTíNEZ-FILGUEIRA, P.; FERNANDEZ-GAMIZ, U.; IBARRA-UDAETA, I. jbay modeling of vane-type vortex generators and study on airfoil aerodynamic performance. **Energies**, v. 13, n. 10, p. 2423, 2020.

DAS, A. K.; HIREMATH, S. S. Multi-objective optimization of a novel butterfly-wing vortex generator fabricated in a rectangular microchannel based on cfd and nsga-ii genetic algorithm. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 234, p. 121187, 2023.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 2021.

DUDEK, J. C. Empirical model for vane-type vortex generators in a navier-stokes code. **AIAA Journal**, v. 44, n. 8, p. 1779–1789, 2006.

EMBUENA, F. T.; DOERFFER, P.; FLASZYNSKI, P.; SZULC, O. Passive flow control application for rotorcraft in transonic conditions. **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow**, Emerald Publishing Limited, v. 28, n. 5, p. 1080–1095, 2018.

FAHAD, M. K.; IFRAJ, N. F.; TAHSIN, S. H.; HASAN, M. J. Numerical investigation of the hydrothermal performance of novel vortex generators in a rectangular channel by employing inclination and rotational angles. **International Journal of Thermofluids**, v. 20, p. 100500, 2023.

Fernández-Gámiz, U.; VELTE, C. M.; RÉTHORÉ, P.; SØRENSEN, N. N.; EGUSQUIZA, E. Testing of self-similarity and helical symmetry in vortex generator flow simulations. **Wind Energy**, v. 19, n. 6, p. 1043–1052, 2016.

FERREIRA, G. W. de S.; REBOITA, M.; RIBEIRO, J.; CARVALHO, V.; SANTIAGO, M.; SILVA, P.; BALDONI, T.; SOUZA, C. de. Assessment of the wind power density over south america simulated by cmip6 models in the present and future climate. **Climate Dynamics**, Springer, v. 62, n. 3, p. 1729–1763, 2024.

FERROUILLAT, S.; TOCHON, P.; GARNIER, C.; PEERHOSSAINI, H. Intensification of heat-transfer and mixing in multifunctional heat exchangers by artificially generated streamwise vorticity. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 16, p. 1820–1829, 2006.

FLORENTIE, L.; HULSHOFF, S. J.; ZUIJLEN, A. H. van. Adjoint-based optimization of a source-term representation of vortex generators. **Computers & Fluids**, v. 162, p. 139–151, 2018.

FORSTER, K. J.; WHITE, T. R. Numerical investigation into vortex generators on heavily cambered wings. **AIAA Journal**, v. 52, n. 5, p. 1059–1071, 2014.

FOUATIH, O. M.; IMINE, B.; MEDALE, M. Numerical/experimental investigations on reducing drag penalty of passive vortex generators on a naca 4415 airfoil. **Wind Energy**, v. 22, n. 7, p. 1003–1017, 2019.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos .** [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

FUGLSANG, P.; BAK, C. Development of the risø wind turbine airfoils. **Wind Energy**, v. 7, n. 2, p. 145–162, 2004.

GALERA, L.; MARTINEZ-FILGUEIRA, P.; Fernández-Gámiz, U.; ZULUETA, E.; LOPEZ, J.; BLANCO, J. A triangular vortex generator modeling on a du97-w-300 airfoil by a source term model. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 233, n. 5, p. 635–645, 2019.

GAO, L.; ZHANG, H.; LIU, Y.; HAN, S. Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines. **Renewable Energy**, v. 76, p. 303–311, 2015.

GARCIA-RIBEIRO, D.; BRAVO-MOSQUERA, P. D.; AYALA-ZULUAGA, J. A.; MARTINEZ-CASTAÑEDA, D. F.; VALBUENA-AGUILERA, J. S.; CERÓN-MUÑOZ, H. D.; VACA-RIOS, J. J. Drag reduction of a commercial bus with add-on aerodynamic devices. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 237, n. 7, p. 1623–1636, 2023.

GNATOWSKA, R.; GAJEWSKA, K.; KAŃTOCH, R. Numerical calculations of vgs influence on aerodynamic characteristics of airfoil. **Acta Physica Polonica A**, v. 139, n. 5, p. 586–589, 2021.

GOHARSHADI, M.; MIRZAEI, M. Delaying the stall of a low-wing aircraft using a novel powerful vortex generator. **Inventions**, v. 7, n. 4, p. 95, 2022.

GONÇALVES, A. N. C.; PEREIRA, J. M. C.; SOUSA, J. M. M. Passive control of dynamic stall in a h-darrieus vertical axis wind turbine using blade leading-edge protuberances. **Applied Energy**, v. 324, p. 119700, 2022.

GU, Y.; ZOU, T.; LIU, H.; LIN, Y.; REN, H.; LI, Q. Status and challenges of marine current turbines: A global review. **Journal of Marine Science and Engineering**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 6, p. 884, 2024.

GUTIERREZ-AMO, R.; FERNANDEZ-GAMIZ, U.; ERRASTI, I.; ZULUETA, E. Computational modelling of three different sub-boundary layer vortex generators on a flat plate. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3107, 2018.

HAMDAN, H.; DOL, S. S.; GOMAA, A. H.; TAHHAN, A. B. A.; RAMAHI, A. A.; TURKMANI, H. F.; ALKHEDHER, M.; AJAJ, R. Experimental and numerical study of novel vortex bladeless wind turbine with an economic feasibility analysis and investigation of environmental benefits. **Energies**, v. 17, n. 1, p. 214, 2023.

HAMZA, N. F. A.; ALJABAIR, S. Evaluation of thermal performance factor by hybrid nanofluid and twisted tape inserts in heat exchanger. **Heliyon**, v. 8, n. 12, p. e11950, 2022.

HARTWANGER, D.; HORVAT, A. 3d modelling of a wind turbine using cfd. In: SN. **NAFEMS Conference, United Kingdom**. [S.l.], 2008.

HASAN, M. M.; EL-SHAHAT, A.; RAHMAN, M. Performance investigation of three combined airfoils bladed small scale horizontal axis wind turbine by bem and cfd analysis. **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 5, n. 5, p. 1, 2017.

HIMO, R.; BOU-MOSLEH, C.; HABCHI, C. Aerodynamic performance enhancement of an airfoil using trapezoidal vortex generators. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 93, n. 1, p. 76–84, 2021.

HU, H.; LI, X.; GU, B. Flow characteristics study of wind turbine blade with vortex generators. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2016, p. 1–11, 2016.

HU, J.; WANG, R.; HUANG, D. Improvements of performance and stability of a single-stage transonic axial compressor using a combined flow control approach. **Aerospace Science and Technology**, v. 86, p. 283–295, 2019.

HWANG, S. W.; KIM, D. H.; MIN, J. K.; JEONG, J. H. Cfd analysis of fin tube heat exchanger with a pair of delta winglet vortex generators. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 26, n. 9, p. 2949–2958, 2012.

IM, H.; KIM, S.; KIM, B. Investigation of effective design and application of vortex generators for the wind turbine blades. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 39, n. 2, p. 671–685, 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable power generation costs in 2022**. 2023. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022. Acesso em: 30 jun. 2024.

ITO, Y.; MURAYAMA, M.; KOIKE, S.; YAMAMOTO, K.; NAKAKITA, K.; KUSUNOSE, K. Computational investigation of vertical stabilizer with vortex generators and dorsal fin. **Journal of Aircraft**, v. 56, n. 5, p. 1833–1848, 2019.

JABER, A. S.; MAHDI, H. B.; ABDUL-JABBAR, T. A.; KOTB, H.; ABORAS, K. M.; GHADI, Y. Y.; EMARA, A.; OUBELAID, A. A comprehensive overview of wind turbine controller technology: Emerging trends and challenges. **Wind Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, p. 0309524X241230632, 2024.

JACOBS, E. N.; WARD, K. E.; PINKERTON, R. M. **The Characteristics of 78 related airfoil section from tests in the Variable-Density Wind Tunnel**. [S.l.]: US Government Printing Office, 1933.

JAHROMI, A. A. B.; MITRA, N. K.; BISWAS, G. Numerical investigations on enhancement of heat transfer in a compact fin-and-tube heat exchanger using delta winglet type vortex generators. **Journal of Enhanced Heat Transfer**, v. 6, n. 1, p. 1–11, 1999.

JIRASEK, A. Vortex-generator model and its application to flow control. **Journal of Aircraft**, v. 42, n. 6, p. 1486–1491, 2005.

KABEEL, A. E.; EL-AGUOZ, E.-S.; BAKRY, A. I.; SHAHIN, M. R. Modelling the wake flow behind a model of horizontal axis wind turbine using rans approach: a comparative study. **Journal of Engineering Research**, v. 4, n. 12, p. 36–50, dez. 2020.

KAVIANI, H. R.; MOSHFEGHI, M. Power generation enhancement of horizontal axis wind turbines using bioinspired airfoils: A cfd study. **Machines**, MDPI, v. 11, n. 11, p. 998, 2023.

KHAN, M. A. J.; POHEKAR, S. D.; BAGADE, P. M.; GAIKWAD, M. U.; SINGH, M. Cfd analysis of naca 4415 marine propeller ducts for managing flow separation. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 19, n. 3, p. 2021–2033, 2025.

KHARE, A.; KHURANA, S. Detached eddy simulation of micro-vortex generators mounted on naca 4412 airfoil. **Journal of Fluids Engineering**, v. 147, n. 6, 2025.

KONSTANTINOVSKAYA, T. V.; BORISOV, V. E.; LUTSKY, A. E. Visualization methods of vortex structures acting on the wing in high-speed flows. **Scientific Visualization**, v. 16, n. 4, p. 109–119, 2024.

KOOPMAN, A. E.; SOMMERS, A. D.; HERMES, C. J. L. Using patterned surface wettability to enhance air-side heat transfer through frozen water droplet vortex generators – part ii: Cfd simulation results. **International Journal of Refrigeration**, v. 131, p. 737–745, 2021.

KÜPPER, C.; HENRY, F. S. Numerical simulation of flow in a circular duct fitted with air-jet vortex generators. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 38, n. 10, p. 919–943, 2002.

LAUNDER, B.; SPALDING, D. Mathematical model of turbulence academic press inc. **San Diego, CA**, 1972.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. In: **Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion**. [S.l.]: Elsevier, 1983. p. 96–116.

LEE, H. M.; KWON, O. J. Numerical simulation of horizontal axis wind turbines with vortex generators. **International Journal of Aeronautical and Space Sciences**, v. 20, n. 2, p. 325–334, 2019.

LI, J.; JI, L. Efficient design method for applying vortex generators in turbomachinery. **Journal of Turbomachinery**, v. 141, n. 8, 2019.

LIN, J. C. Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation. **Progress in aerospace sciences**, Elsevier, v. 38, n. 4-5, p. 389–420, 2002.

LIN, J. C.; ROBINSON, S. K.; MCGHEE, R. J.; VALAREZO, W. O. Separation control on high-lift airfoils via micro-vortex generators. **Journal of aircraft**, v. 31, n. 6, p. 1317–1323, 1994.

LIU, X. Numerical study of flow in conical diffuser with vortex generator jets. **Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)**, v. 20, n. 01, p. 5, 2007.

LIU, Y.; ZHE, H.; XUE, Y.; TAN, J.; YUAN, P.; ZHANG, Q. Effects of vortex generator on the hydrodynamic characteristics of hydrofoil and horizontal axis tidal turbine. **Physics of Fluids**, v. 35, n. 3, 2023.

MA, S.; CHU, W.; ZHANG, H.; LI, X.; KUANG, H. Effects of modified micro-vortex generators on aerodynamic performance in a high-load compressor cascade. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 233, n. 3, p. 309–323, 2019.

MAHMUDDIN, F.; KLARA, S.; SITEPU, H.; HARIYANTO, S. Airfoil lift and drag extrapolation with viterna and montgomerie methods. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 105, p. 811–816, 2017.

MANSHADI, M. D.; HEJRANFAR, K.; FARAJOLLAHI, A. H. Effect of vortex generators on hydrodynamic behavior of an underwater axisymmetric hull at high angles of attack. **Journal of Visualization**, v. 20, n. 3, p. 559–579, 2017.

MAOUEDJ, R.; MENNI, Y.; INC, M.; CHU, Y.-M.; AMEUR, H.; LORENZINI, G. Simulating the turbulent hydrothermal behavior of oil/mwcnt nanofluid in a solar channel heat exchanger equipped with vortex generators. **Computer Modeling in Engineering & Sciences**, v. 126, n. 3, p. 855–889, 2021.

MARBOUH, J. E.; ELYAMANI, N. E. E. K. Evaluation of rans turbulence models, including the geko model for turbulent flow around a wind turbine blade s809. In: SPRINGER. **International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences**. [S.l.], 2023. p. 253–264.

MARTEN, D.; LENNIE, M.; PECHLIVANOGLOU, G.; NAYERI, C. N.; PASCHEREIT, C. O. Implementation, optimization, and validation of a nonlinear lifting line-free vortex wake module within the wind turbine simulation code qblade. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, American Society of Mechanical Engineers, v. 138, n. 7, p. 072601, 2016.

MARTÍNEZ-FILGUEIRA, P.; FERNANDEZ-GAMIZ, U.; ZULUETA, E.; ERRASTI, I.; FERNANDEZ-GAUNA, B. Parametric study of low-profile vortex generators. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 42, n. 28, p. 17700–17712, 2017.

MARZOUK, O. A.; BADI, O. R. H. A.; RASHDI, M. H. S. A.; BALUSHI, H. M. E. A. Proposed 2mw wind turbine for use in the governorate of dhofar at the sultanate of oman. **Science**, v. 7, n. 2, p. 20–28, 2019.

MAURO, S.; LANZAFAME, R.; MESSINA, M. Detailed cfd-bem analysis about the effects of twist and taper of hawts on the rotational augmentation phenomenon. **Energy**, Elsevier, v. 314, p. 134158, 2025.

MENTER, F.; LECHNER, R.; MATYUSHENKO, A. Best practice: Generalized k-ω (geko) two-equation turbulence modeling in ansys cfd. **ANSYS: Cannon Sburg, PA, USA**, p. 1–32, 2021.

MEREU, R.; PASSONI, S.; INZOLI, F. Scale-resolving cfd modeling of a thick wind turbine airfoil with application of vortex generators: Validation and sensitivity analyses. **Energy**, v. 187, p. 115969, 2019.

MEUNIER, M.; BRUNET, V. High-lift devices performance enhancement using mechanical and air-jet vortex generators. **Journal of Aircraft**, v. 45, n. 6, p. 2049–2061, 2008.

MO, Q.; GUAN, H.; HE, S.; LIU, Y.; GUO, R. Guidelines for the computational domain size on an urban-scale vawt. In: **MEMAT 2021, [Local do evento]. Journal of Physics: Conference Series, v. 1820, 2021. art. 012177**. [S. l.]: IOP Publishing, 2021.

MONTGOMERIE, B. **Methods for root effects, tip effects and extending the angle of attack range to $\pm$ 180 deg., with application to aerodynamics for blades on wind turbines and propellers (Report FOI-R–1305–SE)**. Stockholm: Swedish Defence Research Agency, 2004. 71 p.

MOON, H.; JEONG, J.; PARK, S.; HA, K.; JEONG, J.-H. Numerical and experimental validation of vortex generator effect on power performance improvement in mw-class wind turbine blade. **Renewable Energy**, v. 212, p. 443–454, 2023.

MOON, H.-G.; PARK, S.; HA, K.; JEONG, J.-H. Cfd-based in-depth investigation of the effects of the shape and layout of a vortex generator on the aerodynamic performance of a multi-mw wind turbine. **Applied Sciences**, MDPI, v. 11, n. 22, p. 10764, 2021.

MORGADO, J.; VIZINHO, R.; SILVESTRE, M.; PÁSCOA, J. Xfoil vs cfd performance predictions for high lift low reynolds number airfoils. **Aerospace Science and Technology**, Elsevier, v. 52, p. 207–214, 2016.

MOUSSAVI, S. A.; GHAZNAVI, A. Effect of boundary layer suction on performance of a 2 mw wind turbine. **Energy**, Elsevier, v. 232, p. 121072, 2021.

NGUYEN, V. B.; POH, H. J.; ZHANG, Y.-W. Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations. **Powder Technology**, Elsevier, v. 256, p. 100–112, 2014.

PAPP, B.; KRISTÓF, G.; GROMKE, C. Application and assessment of a gpu-based les method for predicting dynamic wind loads on buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 217, p. 104739, 2021.

PARRA, H. G.; CERON, H. D.; GOMEZ, W.; GAONA, E. E. Experimental analysis of bio-inspired vortex generators on a blade with s822 airfoil. **Energies**, v. 16, n. 12, p. 4538, 2023.

POURFATTAH, F.; SABZPOOSHANI, M. On the thermal management of a power electronics system: Optimization of the cooling system using genetic algorithm and response surface method. **Energy**, v. 232, p. 120951, 2021.

RADFAR, S.; KIANOUSH, B.; NEZHAD, M. M.; NESHAT, M. Developing an extended virtual blade model for efficient numerical modeling of wind and tidal farms. **Sustainability**, MDPI, v. 14, n. 21, p. 13886, 2022.

REBOUCAS FILHO, P. P.; NASCIMENTO, N. M. M.; ALVES, S. S. A.; GOMES, S. L.; MEDEIROS, C. M. S. Estimation of the energy production in a wind farm using regression methods and wind speed forecast. In: **BRAZILIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS (BRACIS), 7., 2018, [S. l.]. Anais [...]**. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 79–84.

REICHERT, B. A.; WENDT, B. J. Improving curved subsonic diffuser performance with vortex generators. **AIAA Journal**, v. 34, n. 1, p. 65–72, 1996.

REN, X.; SHEN, S.; YANG, Y.; LV, H.; GUO, Y. Comparison of les and rans simulation on turbulent round jet. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, p. 1–12, 2023.

REYNOLDS, O. Iv. on the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. **Philosophical transactions of the royal society of london.(a.)**, The Royal Society London, n. 186, p. 123–164, 1895.

REZAEIHA, A.; KALKMAN, I.; BLOCKEN, B. Cfd simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. **Renewable energy**, Elsevier, v. 107, p. 373–385, 2017.

REZAEIHA, A.; MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. Towards accurate cfd simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 156, p. 301–316, 2018.

RHOADES, M. M.; HEALEY, J. V. Flight deck aerodynamics of a nonaviation ship. **Journal of Aircraft**, v. 29, n. 4, p. 619–626, 1992.

ROOIJ, R. P. J. O. M. van; TIMMER, W. A. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 125, n. 4, p. 468–478, 2003.

ROSENFELD, M.; KATIJA, K.; DABIRI, J. O. Circulation generation and vortex ring formation by conic nozzles. **Journal of Fluids Engineering**, v. 131, n. 9, 2009.

SALLEH, M. F. M.; MOHAMMED, H. A.; WAHID, M. A. Thermal and hydraulic characteristics of trapezoidal winglet across fin-and-tube heat exchanger (fthe). **Applied Thermal Engineering**, v. 149, p. 1379–1393, 2019.

SATRIO, D.; ERWANDI; RAHUNA, D. Investigation of enhanced peak lift performance and stall angle delay by attachment of vortex generators on blade surfaces of vertical axis ocean current turbine. **Ocean Engineering**, v. 326, p. 120762, 2025.

SAYDAM, A. Z.; GOKCAY, S.; INSEL, M. Cfd based vortex generator design and full-scale testing for wake non-uniformity reduction. **Ocean Engineering**, v. 153, p. 282–296, 2018.

SCHAFFARCZYK, A. P.; LOBO, B. A.; BALARESQUE, N.; KREMER, V.; SUHR, J.; WANG, Z. Development and measurement of a very thick aerodynamic profile for wind turbine blades. **Wind**, v. 4, n. 3, p. 190–207, 2024.

SHERMAN, J. **Wind power**. [S.l.]: Capstone, 2007.

SILVA, F. A. S.; SALVIANO, L. O. Heat transfer enhancement in a flat-plate solar water heater through longitudinal vortex generator. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 141, n. 4, 2019.

SOLNAY, D. Á.; MOLNÁR, J.; LAKATOS, I. Effects of location and height of vortex generators on aerodynamic performance of naca 4412 airfoil. **Periodica Polytechnica Transportation Engineering**, v. 53, n. 3, p. 267–276, 2025.

SOUZA, S. F. d. **Análise e simulação de turbinas eólicas de eixo vertical (Darrieus e Lenz2) e horizontal para o dimensionamento de geradores elétricos**. 80 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2018.

SPERA, D. A. The brush wind turbine generator as described in scientific american of december 20, 1890. In: **WIND TURBINE STRUCTURAL DYNAMICS, 1977, Cleveland, Ohio. Anais [...]**. Washington, DC: NASA, 1977. p. 275.

STRAUB, D.; WEBER, J.; ROY, A.; LEE, C.-S.; SHIH, T. I.-P. Effects of downstream vortex generators on film cooling a flat plate fed by crossflow. **Journal of Turbomachinery**, v. 146, n. 5, 2024.

SUAREZ, J. M.; FLASZYNSKI, P.; DOERFFER, P. Streamwise vortex generator for separation reduction on wind turbine rotors. **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow**, v. 28, n. 5, p. 1047–1060, 2018.

ŞUMNU, A.; ERASLAN, Y. Aerodynamic shape optimization of simplified ground vehicle (ahmed body) using passive control devices. **Mechanics**, v. 31, n. 1, p. 5–14, 2025.

SUNDARAVADIVEL, T. A.; SARAVANAN, P.; RAMACHANDRARAO, M.; JOHNSON, A. A. Aerodynamic analysis of flow over naca 0015 aerofoil with vortex generators and leading edge tubercles. **International Journal of Vehicle Structures and Systems**, 2025.

SZABÓ, A.; NAGY, P. T.; KULCSÁR, M.; BAETS, G. de; VANIERSCHOT, M.; PAÁL, G. Numerical investigation of miniature vortex generators on an airfoil. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 47, n. 3, p. 129, 2025.

TACHOS, N.; FILIOS, A.; MARGARIS, D. A comparative numerical study of four turbulence models for the prediction of horizontal axis wind turbine flow. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 224, n. 9, p. 1973–1979, 2010.

TAI, T. C. Effect of midwing vortex generators on v-22 aircraft forward-flight aerodynamics. **Journal of Aircraft**, v. 40, n. 4, p. 623–630, 2003.

TEBBICHE, H.; BOUTOUDJ, M. S. Turbulent flow control with vortex generators around a symmetrical airfoil at high attack angles. **Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics**, v. 13, n. 2, p. 67–86, 2019.

TINOCO, E. N.; BOGUE, D. R.; KAO, T.-J.; YU, N. J.; LI, P.; BALL, D. N. Progress toward cfd for full flight envelope. **The Aeronautical Journal**, v. 109, n. 1100, p. 451–460, 2005.

TIWARI, N.; FLASZYNSKI, P.; SURESH, T.; SZULC, O. Comparison of flow structures for vane and rod type vortex generators on a wind turbine airfoil. **International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow**, v. 33, n. 4, p. 1458–1474, 2023.

URKIOLA, A.; FERNANDEZ-GAMIZ, U.; ERRASTI, I.; ZULUETA, E. Computational characterization of the vortex generated by a vortex generator on a flat plate for different vane angles. **Aerospace Science and Technology**, v. 65, p. 18–25, 2017.

VARPE, M. K.; PRADEEP, A. M. Benefits of nonaxisymmetric endwall contouring in a compressor cascade with a tip clearance. **Journal of Fluids Engineering**, v. 137, n. 5, 2015.

VERMEER, L.; SØRENSEN, J. N.; CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. **Progress in aerospace sciences**, Elsevier, v. 39, n. 6-7, p. 467–510, 2003.

VITA, G.; HEMIDA, H.; ANDRIANNE, T.; BANIOTOPOULOS, C. The effect of the integral length scale of turbulence on a wind turbine aerofoil. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 204, p. 104235, 2020.

VITERNA, L. A.; JANETZKE, D. C. **Theoretical and experimental power from large horizontal-axis wind turbines**. [S. l.]: [s. n.], 1982.

WANG, H.; ZHANG, B.; QIU, Q.; XU, X. Flow control on the nrel s809 wind turbine airfoil using vortex generators. **Energy**, v. 118, p. 1210–1221, 2017.

WANG, Q.; YANG, S.; WANG, H.; WANG, J. Aerodynamic shape integrated design of wind turbine airfoils and vortex generators. **International Journal of Green Energy**, v. 19, n. 7, p. 747–756, 2022.

WANG, W.; SIOURIS, S.; QIN, N. Hybrid rans/les for active flow control. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 86, n. 3, p. 179–187, 2014.

WIJAYANTA, A. T.; AZIZ, M.; KARIYA, K.; MIYARA, A. Numerical study of heat transfer enhancement of internal flow using double-sided delta-winglet tape insert. **Energies**, v. 11, n. 11, p. 3170, 2018.

WIJIATMOKO, E. G.; YOHANA, E.; NUGROHO, P. A.; TAUVIQIRRAHMAN, M.; PANE, I. Z. Cfd analysis of counter-rotating vane-type wing vortex generator for regional aircraft. **CFD LETTERS**, v. 16, n. 11, p. 1–16, 2024.

YAN, Y.; AVITAL, E.; WILLIAMS, J.; CUI, J. Cfd analysis for the performance of micro-vortex generator on aerofoil and vertical axis turbine. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, n. 4, 2019.

YAYLA, S.; AYÇA, S.; ORUÇ, M. A case study on piezoelectric energy harvesting with using vortex generator plate modeling for fluids. **Renewable Energy**, v. 157, p. 1243–1253, 2020.

ZASTAWNY, M. Numerical simulation of wing vortex generators – methodologies and validation. **The Aeronautical Journal**, v. 120, n. 1226, p. 627–650, 2016.

ZHANG, W.; TANG, F.; SHI, L.; HU, Q.; ZHOU, Y. Effects of an inlet vortex on the performance of an axial-flow pump. **Energies**, v. 13, n. 11, p. 2854, 2020.

ZHAO, Z.; CHEN, M.; LIU, H.; WANG, T.; XU, B. Research on parametric modeling methods for vortex generators on flat plate. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 13, n. 3, 2021.

ZHAO, Z.; SHEN, W.; WANG, R.; WANG, T.; XU, B.; ZHENG, Y.; QIAN, S. Modeling of wind turbine vortex generators in considering the inter-effects between arrays. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 9, n. 5, 2017.

ZHEN, T. K.; ZUBAIR, M.; AHMAD, K. A. Experimental and numerical investigation of the effects of passive vortex generators on aludra uav performance. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 24, n. 5, p. 577–583, 2011.

ZHOU, Z.; TKACHENKO, S.; BAHL, P.; TAVENER, D.; SILVA, C. de; TIMCHENKO, V.; JIANG, J. Y.; KEEVERS, M.; GREEN, M. Passive pv module cooling under free convection through vortex generators. **Renewable Energy**, v. 190, p. 319–329, 2022.

ZHU, C.; WANG, T.; WU, J. Numerical investigation of passive vortex generators on a wind turbine airfoil undergoing pitch oscillations. **Energies**, v. 12, n. 4, p. 654, 2019.