



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LETÍCIA COSTA OLIVEIRA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PÁS NA TURBULÊNCIA CAUSADA
POR TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Recife
2025

LETÍCIA COSTA OLIVEIRA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PÁS NA TURBULÊNCIA CAUSADA
POR TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universi-
dade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para
a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Guilherme Barbosa Lopes Junior

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Costa Oliveira Silva, Leticia .

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PÁS NA TURBULÊNCIA
CAUSADA POR TURBINAS EOLICAS DE EIXO HORIZONTAL / Leticia
Costa Oliveira Silva. - Recife, 2025.

45 p. : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Barbosa Lopes Junior
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Energia eólica. 2. CFD. 3. Turbulência. 4. Número de pás. I. Barbosa
Lopes Junior, Guilherme Barbosa Lopes Junior. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LETÍCIA COSTA OLIVEIRA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PÁS NA TURBULÊNCIA CAUSADA
POR TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Univer-
sidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências, como requisito parcial para a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 16/12/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Barbosa Lopes Junior (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Flavio Augusto Bueno Figueiredo (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Dr. Marcus Costa de Araújo (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, proteção e oportunidade.

Aos meus pais Erivania de Oliveira Silva e Gilvan Costa da Silva, que são exemplo para mim, agradeço por todo cuidado, carinho, proteção, amor e por nunca deixarem nada faltar.

Aos meus irmãos, Rafael e Patricia, pelo companheirismo ao longo da jornada que é a vida, meus mais sinceros agradecimentos.

Aos meus avós, em especial a minha estrelinha Maria Veonice por todo apoio, e por me ensinar sobre as coisas importantes da vida.

Ao meu grande amor e agora companheiro de profissão, Guilherme Vinhaes, obrigada pelas palavras de apoio, pelo carinho e cuidado de sempre.

Aos amigos feitos na graduação, agradeço por tornarem o caminho mais leve.

Por fim, agradeço ao professor Guilherme Barbosa, pela paciência e orientação durante o período de desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

A energia eólica ocupa uma posição estratégica na matriz energética brasileira, sendo crucial a otimização da eficiência dos parques eólicos. A formação de esteiras turbulentas (wakes) a jusante das turbinas é um dos fatores de perdas energéticas e fadiga estrutural. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do número de pás na intensidade da turbulência, no arrasto e no torque estático gerados por turbinas eólicas de eixo horizontal. A metodologia adotada consistiu em uma abordagem quantitativa utilizando simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) no software ANSYS. Foram modeladas geometrias de rotores com duas, três, quatro e cinco pás, submetidas a um escoamento de ar com velocidade de 7,35 m/s, utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. As simulações consideraram o rotor em condição estática para isolar os efeitos geométricos da obstrução no escoamento. Os resultados demonstraram que o aumento do número de pás eleva a solidez do rotor, resultando em um aumento significativo na força de arrasto e no torque estático, o que favorece a partida em ventos fracos. Em relação à turbulência, observou-se que rotores com menos pás geram picos de intensidade turbulenta mais elevados e concentrados, enquanto configurações com maior número de pás promovem uma homogeneização mais rápida da esteira. Conclui-se que, embora um maior número de pás aumente o torque inicial, as perdas associadas ao arrasto e a complexidade estrutural justificam a predominância comercial de turbinas com três pás.

Palavras-chave: Energia eólica; CFD; Turbulência; Número de pás.

ABSTRACT

Wind energy plays a strategic role in the Brazilian energy matrix, making the efficiency optimization of wind farms crucial. The formation of turbulent wakes downstream of turbines is a factor in energy losses and structural fatigue. This study aims to analyze the influence of the number of blades on turbulence intensity, drag, and static torque generated by horizontal axis wind turbines. The methodology adopted a quantitative approach using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations in ANSYS software. Rotor geometries with two, three, four, and five blades were modeled and subjected to an airflow velocity of 7.35 m/s, utilizing the $k-\omega$ SST turbulence model. The simulations considered the rotor in a static condition to isolate the geometric effects on the flow obstruction. The results showed that increasing the number of blades increases rotor solidity, resulting in a significant rise in drag force and static torque, which favors start-up in low winds. Regarding turbulence, it was observed that rotors with fewer blades generate higher and more concentrated turbulence intensity peaks, while configurations with a higher number of blades promote faster wake homogenization. It is concluded that, although a higher number of blades increases initial torque, the losses associated with drag and structural complexity justify the commercial predominance of three-bladed turbines.

Palavras-chave: wind energy; CFD; Turbulence; Blade number.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil em MW.	11
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira.	12
Figura 3 – Exemplos de turbinas de eixo vertical e horizontal.	13
Figura 4 – Componentes principais das TEEH	14
Figura 5 – perfil aerodinâmico: nomenclaturas e esforços.	16
Figura 6 – Comparativo de Curvas de Coeficiente de Potência típicas de diferentes turbinas	17
Figura 7 – Fluxograma do trabalho.	24
Figura 8 – Modelo 3D da turbina - três pás.	25
Figura 9 – Modelos tridimensionais da turbina com diferentes números de pás: (a) duas pás, (b) três pás, (c) quatro pás, (d) cinco pás.	26
Figura 10– Domínio computacional	27
Figura 11– Malha computacional	28
Figura 12– Contornos de velocidade das simulações com duas e três pás	33
Figura 13– Contornos de velocidade das simulações com quatro e cinco pás	34
Figura 14– Planos de viscosidade turbulenta a diferentes distâncias	37
Figura 15– Gráfico da relação arrasto <i>versus</i> velocidade	38
Figura 16– Gráfico da relação Momento <i>versus</i> velocidade	38

LISTA DE TABELAS

1	– Dimensões da turbina eólica	26
2	- Dados de arrasto para diferentes números de elementos de malha	31
3	- Taxa de refinamento de malha	31
4	- Resultado do GCI	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativas	9
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivo Geral	10
1.2.2	Objetivos Específicos	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	Contextualização do Setor Eólico Nacional	11
2.2	Fundamentos de turbinas eólicas	12
2.2.1	Classificação das turbinas eólicas	12
2.2.2	principais componentes e princípio de funcionamento	14
2.2.3	Aerodinâmica das pás	15
2.2.4	Desempenho das turbinas	16
2.2.5	Influência do número de pás no desempenho aerodinâmico	17
2.3	Turbulência	18
2.3.1	Formação e características da esteira (wake)	18
2.4	Simulação Computacional	19
2.4.1	Impotância da Simulação	20
2.4.2	Modelos matemáticos e computacionais aplicados	20
2.4.3	Índice de convergência de malha (GCI)	21
2.4.4	Modelos de turbulência	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	Classificação da pesquisa	23
3.2	Definição do Método	23
3.2.1	Modelagem da turbina	25
3.2.2	Domínio computacional e teste de independência de malha	27
3.2.3	Condições de contorno e propriedades do fluido.	29
3.2.4	Modelo de turbulência	30
3.2.5	Análise dos resultados	30
4	RESULTADOS	31
4.1	Teste de independência de malha e GCI	31
4.2	Influência do número de pás na turbulência	32
4.3	Avaliação Estática de Torque e Arrasto	38
5	CONCLUSÕES GERAIS	40

5.1 Limitações e futuros trabalhos	40
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Atualmente reconhece-se como de suma importância a utilização da energia elétrica nas mais diversas esferas da vida humana. Segundo dados do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2025) cerca de 99,8% dos domicílios brasileiros possuem acesso à rede geral de abastecimento elétrico, ou fonte alternativa. Para além da população civil, verifica-se ainda a relevância de tal recurso para indústria e setores de prestação de serviços.

Mais especificamente com relação a distribuição da matriz elétrica brasileira, nota-se que a energia eólica ocupa o segundo lugar na matriz elétrica brasileira, com uma participação de 16,1% na produção de energia elétrica (Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias, 2024), tal fato demonstra a significância estratégica da modalidade para o país e, portanto, revela um ponto de extrema importância: a confiabilidade e eficiência na geração de energia eólica.

Nesse contexto, verifica-se que em um parque eólico, a perda do potencial energético proveniente da coexistência e superposição de várias esteiras pode chegar até 20% do total da energia. Além disso, problemas de fadiga em turbinas estão associados à turbulência, a qual tem influência direta nas forças e momentos gerados na estrutura (WITTWER et al., 2016). Portanto, compreender e mitigar os efeitos da turbulência é essencial para otimizar o desempenho dos parques eólicos, garantir a confiabilidade dos sistemas e ampliar a viabilidade econômica da geração de energia renovável.

1.1 Justificativas

A energia eólica ocupa um local de suma importância na matriz energética brasileira, se consolidando como uma fonte estratégica para o desenvolvimento sustentável do país. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2024), o setor não apenas contribui para a descarbonização evitando emissões de CO₂ e operando de forma renovável, mas tem grande impacto na economia. Entre 2011 e 2020, o setor movimentou cerca de R\$ 321 bilhões na economia e foi responsável pela criação de quase 196 mil postos de trabalho. Além disso, a instalação de parques eólicos correlaciona-se diretamente com o aumento do PIB e do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) nas regiões beneficiadas. Diante da magnitude desses investimentos e da responsabilidade socioambiental atrelada, torna-se imprescindível que a tecnologia empregada seja otimizada para garantir a máxima eficiência e segurança operacional.

A formação de esteiras turbulentas (*wakes*) é um dos fatores de perda de eficiência e fadiga estrutural em parques eólicos. Compreender a intensidade e o comportamento dessa turbulência é importante para o design de componentes que sejam mais eficientes, mais resistentes e para o posicionamento estratégico das torres, visando minimizar os efeitos aerodinâmicos que comprometem a geração de energia. (WITTWER et al., 2016)

Nesse contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de aprofundar a compreensão

do comportamento aerodinâmico da turbina, especificamente na configuração de rotor estático. Embora a maioria dos estudos foque na operação nominal, a análise da turbina parada é fundamental para determinar as cargas extremas de arrasto e o torque de partida, parâmetros que definem a viabilidade estrutural e a capacidade de partida do equipamento.

Ao investigar a influência do número de pás sobre as forças de arrasto, torque e a intensidade da turbulência na esteira, esta pesquisa fornece subsídios para o desenvolvimento de rotores que equilibrem eficiência aerodinâmica com segurança estrutural, contribuindo para a redução de falhas e o aumento da vida útil dos equipamentos eólicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

De modo geral, o objetivo do trabalho será analisar a influência do número de pás na turbulência gerada por turbinas eólicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisar a literatura sobre efeitos do número de pás em turbinas eólicas;
- Projetar modelagem 3D de turbinas com diferentes números de pás mantendo demais parâmetros geométricos iguais (ex.: 2, 3, 4 e 5 pás);
- Realizar simulações numéricas das turbinas modeladas;
- Comparar os resultados entre as configurações.

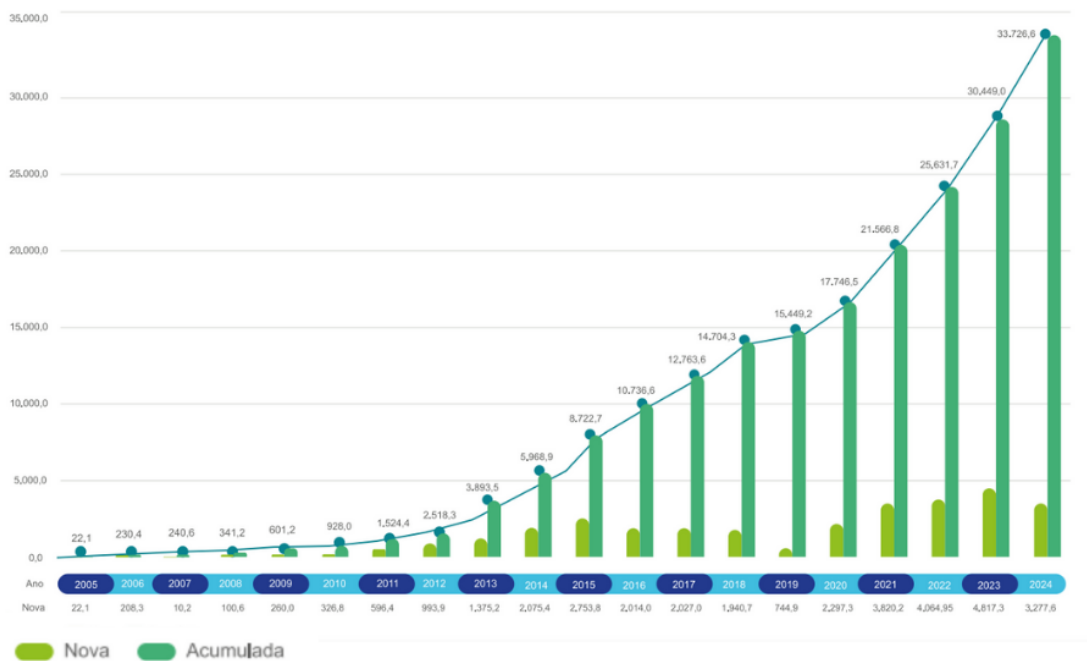
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho apresenta os conceitos bases necessários para a análise desenvolvida no trabalho. Neste tópico são apresentados princípios de funcionamento das turbinas eólicas, a classificação de seus componentes além de conceitos relacionados à turbulência e às simulações computacionais aplicadas.

2.1 Contextualização do Setor Eólico Nacional

No ano de 2024, o Brasil teve um aumento de 7,4% no número de parques eólicos instalados, totalizando 1103 parques. A figura 1 mostra a evolução da capacidade instalada em MW e ainda no ano de 2024, foi registrado 3,3 GW apenas de nova capacidade instalada. No mundo esse número se torna ainda mais expressivo, totalizando 117 GW, representando um recorde de instalação de eólicas *onshore* e *offshore* no mundo (Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias, 2024).

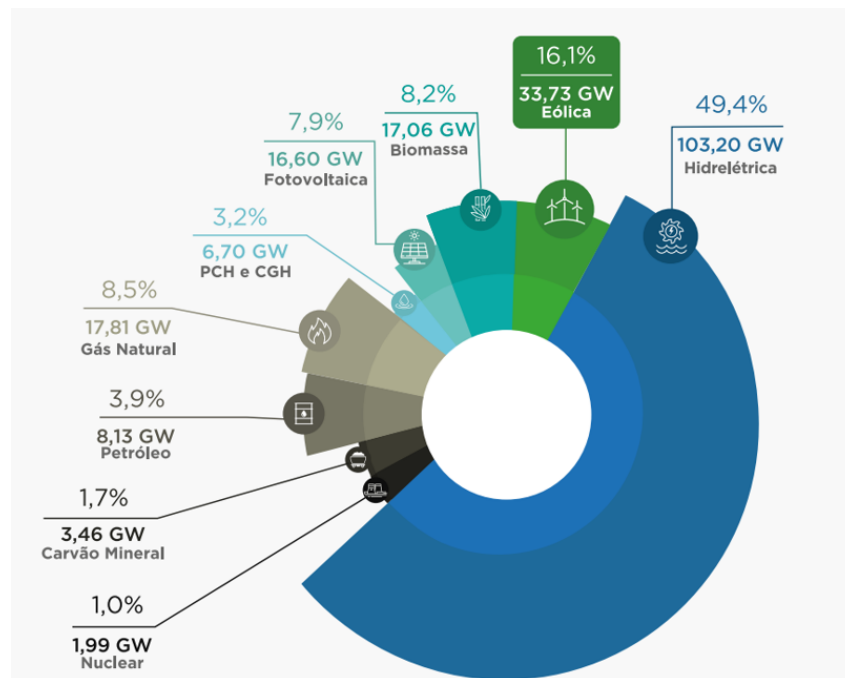
Figura 1– Evolução da capacidade instalada da fonte eólica no Brasil em MW.



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2024)

Ainda segundo Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2024), considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, a eólica foi a segunda fonte que mais cresceu, representando 10,8% da nova capacidade instalada do ano, o que fez a energia proveniente das eólicas atingir 16,1% da matriz elétrica brasileira, conforme apresentado na figura 2.

Figura 2– Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2024)

2.2 Fundamentos de turbinas eólicas

Uma turbina eólica é um equipamento destinado a converter a energia cinética do vento em eletricidade (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Segundo Fox, McDonald e Pritchard (2016), as turbinas eólicas têm sido usadas à séculos para aproveitar a energia proveniente dos ventos. Os moinhos de vento, como eram conhecidos, foram bastante utilizados para moer grãos e acionar bombas de água. A então crescente demanda por fontes de energia renovável, estimulou o interesse pelo projeto e otimização desses moinhos de vento.

2.2.1 Classificação das turbinas eólicas

WHITE (2010) classifica as turbinas eólicas de acordo com a orientação do seu eixo. Elas podem ser turbinas de eixo horizontal (TEEH) ou turbinas de eixo vertical (TEEV).

As turbinas de eixo horizontal apresentam o eixo de rotação paralelo ao solo (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). Elas operam semelhante à uma hélice de avião em marcha ré, utilizando o princípio da sustentação para obter o movimento. Já as turbinas eólicas de eixo vertical possuem o eixo de rotação de maneira perpendicular ao solo onde estão instaladas. Embora diversas configurações de turbinas tenham sido desenvolvidas na busca por um design ideal, houve uma ampla consolidação do modelo de turbina eólica de eixo horizontal com três pás uniformemente espaçadas (ROCHA et al., 2023).

A Figura 3 apresenta exemplos de turbinas de eixo vertical e eixo horizontal.

Figura 3– Exemplos de turbinas de eixo vertical e horizontal.



a) eixo horizontal

b) eixo vertical.

Fonte: ROCHA et al. (2023)

De acordo com Meshram (2025), as turbinas eólicas de eixo horizontal também podem ser classificadas pelo tamanho, aplicação, configuração do rotor e pelo sistema de controle:

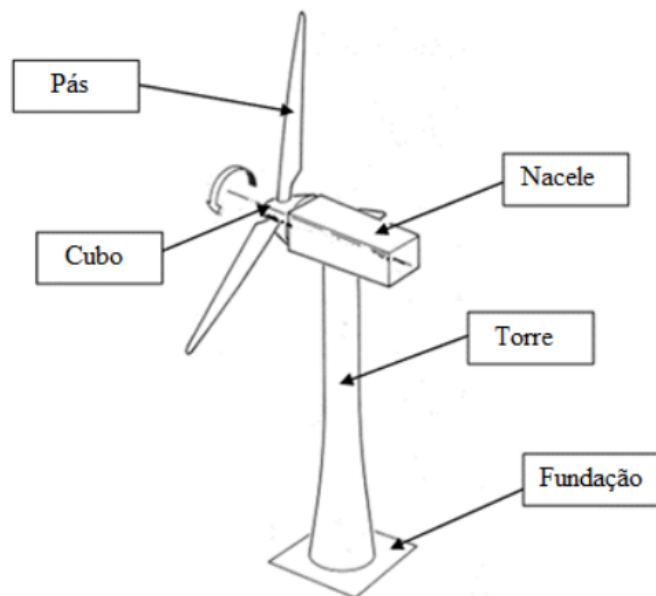
- Classificação pelo tamanho: As turbinas são classificadas em pequenas, médias e grandes turbinas. As turbinas de pequeno porte são utilizadas em residências ou em pequenas aplicações comerciais, podendo chegar até 100 kW de capacidade. As de médio porte são utilizadas em aplicações industriais ou comerciais de maior porte, possuem uma capacidade que varia entre 100 kW e 1 MW. Por último, com capacidade acima de 1MW, as turbinas de grande porte são empregadas em projetos voltados para geração de energia em larga escala.
- Classificação por aplicação: As turbinas podem ser *onshore*, quando instaladas em terra firme; *offshore* quando essas são instaladas no oceano; ou híbridas, que combinam a energia eólica com outras fontes, como solar ou geradores a diesel.
- Classificação de acordo com a configuração do rotor: A configuração mais comum é a *Upwind*, nessa configuração as pás ficam voltadas contra o vento. Já nas Turbinas *Downwind*, as pás ficam voltadas na direção do vento.
- Classificação de acordo com o sistema de controle: Turbinas com Controle por Estol (*Stall-Controlled*) utilizam o estol das pás para regular a geração de energia; as turbinas com Controle por Ângulo de Pás (*Pitch-Controlled*) regulam a potência por meio do ajuste do ângulo das pás e as turbinas com Controle por Estol Ativo (*Active Stall-Controlled*) combinam os sistemas de controle por estol e por ângulo de pás.

2.2.2 principais componentes e princípio de funcionamento

O processo de conversão de energia baseia-se na força aerodinâmica de sustentação (*lift*), responsável por gerar um torque positivo no eixo de rotação. Esse movimento produz energia mecânica, que é posteriormente convertida em energia elétrica por meio de um gerador. O sistema elétrico acoplado à turbina deve ser capaz de lidar com a variabilidade inerente às condições naturais do vento, já que a produção de energia está diretamente relacionada à disponibilidade e à intensidade desse recurso, que é naturalmente instável. (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009)

A Figura 4 apresenta os componentes principais das turbinas eólicas de eixo horizontal: rotor, nacele, torre e fundação.

Figura 4– Componentes principais das TEEH



Fonte: Inestroza (2017)

- a) O rotor, composto por pás em formato aerodinâmico (aerofólio) e cubo, é conectado ao eixo. Esse componente é responsável por converter a energia cinética do vento em energia mecânica (AL-SHEMMERI, 2010);
- b) A nacele protege os componentes internos da turbina eólica contra as intempéries. Ela abriga a caixa de engrenagens (*gearbox*), o gerador e o sistema de controle e proteção (*control and protection system*). A caixa de engrenagens tem a função de ajustar a velocidade de rotação do eixo para torná-la compatível com o gerador, que é responsável

por produzir energia elétrica. Já o sistema de controle e proteção garante que o rotor esteja sempre alinhado com a direção do vento e evita que a turbina opere em condições perigosas. Esse sistema inclui um freio que pode ser acionado automaticamente em situações de vento excessivo, interrompendo a rotação do rotor para preservar a integridade da estrutura (AL-SHEMMERI, 2010) (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009);

- c) A torre é o componente estrutural que conecta o rotor à fundação, elevando-o a alturas onde se encontram ventos mais fortes (AL-SHEMMERI, 2010);
- d) A fundação, ou base, é responsável por sustentar toda a estrutura da turbina eólica, garantindo sua fixação firme ao solo. Normalmente, é constituída por uma robusta estrutura de concreto ao redor da torre, assegurando sua estabilidade e integridade estrutural (AL-SHEMMERI, 2010).

2.2.3 Aerodinâmica das pás

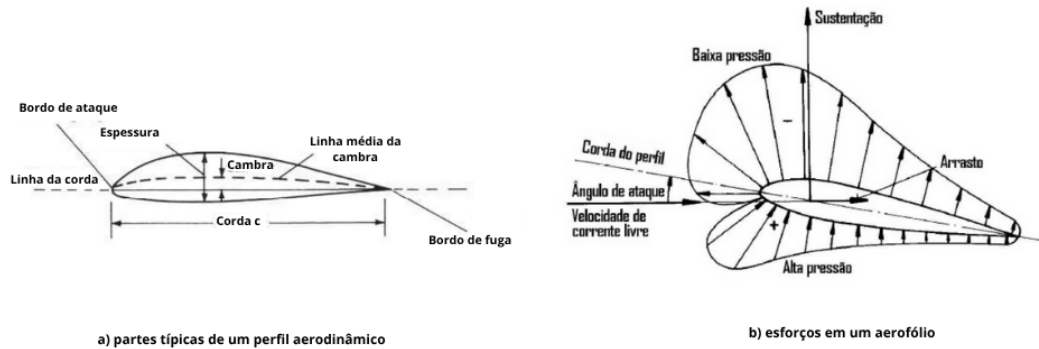
De acordo com Silva (2013), o rotor é o componente mais crítico de uma turbina eólica, uma vez que esse é diretamente responsável por captar a energia cinética do vento. A corrente de vento que incide sobre a área varrida do rotor gera forças aerodinâmicas que atuam diretamente sobre sua estrutura e contribuem para a formação do torque resultante aplicado ao eixo da turbina.

A Figura 5 apresenta alguns dos principais elementos geométricos encontrados em um perfil aerodinâmico, bem como os esforços no mesmo. Segundo (QUEIROZ, 2021), o bordo de ataque é definido como o ponto inicial do aerofólio, enquanto o bordo de fuga corresponde ao ponto final. A corda é a distância projetada entre esses dois pontos, e a reta que os conecta é denominada linha de corda. A linha média de camber (ou linha de curvatura média) é o traçado que une o bordo de ataque ao bordo de fuga, de modo que a distância entre as superfícies superior e inferior do aerofólio seja igual em todos os pontos. A distância entre a linha média e a linha de corda representa a camber ou curvatura do perfil. Já a espessura é definida como a distância entre as superfícies superior e inferior do aerofólio, expressa em porcentagem da corda e medida perpendicularmente à linha de corda.

No que diz respeito aos esforços, a força de sustentação atua na direção perpendicular à velocidade da corrente livre, enquanto a força de arrasto (*drag*) atua paralela a essa mesma direção. (DIXON; HALL, 2014).

Não é prático expressar individualmente as forças de arrasto e sustentação para cada situação possível, por isso convenientemente são utilizados números adimensionais, que representem as características de arrasto e sustentação de um corpo. Esses parâmetros são conhecidos como coeficiente de arrasto (C_D) e coeficiente de sustentação (C_L). Tais coeficientes estão expostos nas Equações 1 e 2 (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Figura 5– perfil aerodinâmico: nomenclaturas e esforços.



Fonte: Adaptado de Jr. (2017) e Silva (2013).

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

Onde:

- C_L - Coeficiente de sustentação;
- C_D - Coeficiente de arrasto;
- F_L - Força de sustentação;
- F_D - Força de arrasto;
- $\frac{1}{2}\rho V^2$ - Pressão dinâmica, sendo ρ e V a massa específica e a velocidade do fluido, respectivamente;
- A - Área planiforme (a área vista por uma pessoa que está olhando para o corpo de cima, em uma direção normal ao corpo)

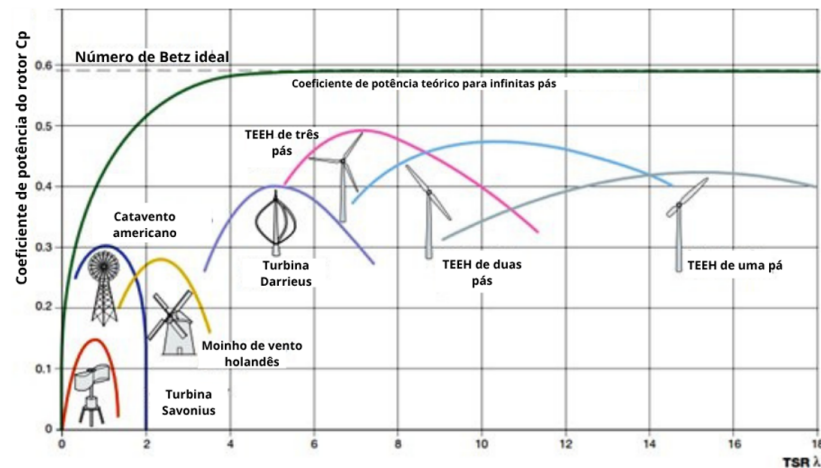
2.2.4 Desempenho das turbinas

Quanto ao desempenho e eficiência energética, Bontempo e Manna (2025) apresentam o conhecido limite de Betz. De acordo com esse limite, um dispositivo simples de conversão de energia eólica não pode extrair mais do que 59,3% da energia cinética do vento contida em um tubo de corrente com área frontal equivalente à do dispositivo. Em outras palavras, o valor máximo do coeficiente de potência (C_p) - caracterizado pela razão entre a potência fornecida pela turbina e a potência contida no vento - é teoricamente limitado a 0,593, representando o limite da quantidade de energia que pode ser extraída do vento.

Esse resultado é válido sob condições ideais, considerando um escoamento estacionário, não viscoso, incompressível e não confinado, com perfil de velocidade uniforme a montante, no infinito. Além disso, pressupõe-se que a turbina seja modelada como um disco atuador, o qual representa a carga imposta pela turbina ao fluxo, introduzindo uma descontinuidade na pressão estática ao longo de sua superfície.

A Figura 6 mostra um Comparativo de Curvas de Coeficiente de Potência típicas de diferentes turbinas.

Figura 6– Comparativo de Curvas de Coeficiente de Potência típicas de diferentes turbinas



Fonte: Adaptado de López, Leal e Lemos (2015)

2.2.5 Influência do número de pás no desempenho aerodinâmico

Segundo Souza (2018), outro parâmetro importante nos estudos de análises de sistemas eólicos é a solidez do rotor (σ). Representado pela equação 3, a solidez indica a relação da área total das pás pela área varrida por elas. Quanto maior a solidez, maior o torque na partida e menor valor da velocidade na ponta da pá, já solidez menores indicam menor torque de partida e maior velocidades na ponta da pá.

$$\sigma = \frac{\text{Área das pás}}{\text{Área varrida}} \quad (3)$$

A grande maioria das turbinas eólicas de eixo horizontal possuem duas ou três pás. Os critérios para escolha do número de pás incluem a razão de velocidade na ponta projetada (TSR), o impacto sobre o coeficiente de potência, C_P , e fatores adicionais como peso, custo, comportamento estrutural e resistência à fadiga (DIXON; HALL, 2014).

É possível perceber a partir da figura 6, que para menores razões de velocidade na ponta da pá, o coeficiente de potencia tende a ser maior a medida que o número de pás aumenta. Ainda segundo Dixon e Hall (2014), há um aumento significativo em C_P ao passar de uma pá para duas pás, um ganho menor ao passar de duas para três, e assim sucessivamente para números

maiores de pás. O que acontece é que na prática, os ganhos aparentes no coeficiente de potência são rapidamente anulados quando se incluem as perdas por atrito das pás em turbinas com mais de duas ou três pás.

Tangler (2000) apud Dixon e Hall (2014) também diz que questões como ruído do rotor e estética apoiam fortemente a escolha de três pás em vez de duas ou mesmo uma.

2.3 Turbulência

Alguns escoamentos apresentam comportamento suave e ordenado, enquanto outros são marcadamente caóticos. O movimento organizado dos fluidos, caracterizado por camadas paralelas e contínuas, é conhecido como escoamento laminar. Por outro lado, o escoamento turbulento ocorre em velocidades elevadas e é marcado por movimentos irregulares e flutuações de velocidade. Fluidos de baixa viscosidade, como o ar, tendem a apresentar esse comportamento quando submetidos a altas velocidades. Existe ainda o escoamento transitório, que representa uma transição entre os regimes laminar e turbulento (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Segundo (WHITE, 2010), o número de Reynolds é o principal parâmetro adimensional utilizado para determinar o regime de escoamento. À medida que esse número aumenta, o comportamento do fluido tende a deixar de ser suave e previsível, tornando-se instável e flutuante, o que caracteriza a iniciação da turbulência.

Esse número adimensional representa a relação entre forças inerciais e forças viscosas. De acordo com Souza (2018), para perfis eólicos, o número de Reynolds é dado pela equação 4.

$$Re = \frac{V \cdot c \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

Onde:

- V - Velocidade do vento incidente sobre a pá;
- c - comprimento da corda do aerofólio;
- ρ - densidade do ar;
- μ - viscosidade do fluido.

Na engenharia de energia eólica, compreender a turbulência é essencial, pois ela afeta diretamente as cargas flutuantes, a produção de energia e as tensões estruturais em turbinas e torres (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

2.3.1 Formação e características da esteira (wake)

A região da esteira corresponde à área localizada a sotavento de uma turbina eólica. A passagem do vento pela turbina gera turbulência, devido a rotação das pás do rotor, com isso tem-se o chamado efeito esteira. Essa turbulência pode influenciar diretamente a produção

de potência dos aerogeradores posicionados logo atrás. Quando a atmosfera está instável, a dissipação das esteiras turbulentas ocorre mais rapidamente. Já em condições de estabilidade, os efeitos da esteira tendem a se prolongar, impactando por mais tempo o desempenho das turbinas posteriores (BARBOSA et al., 2025).

De acordo com Voutsinas et al (1993) apud Manwell, McGowan e Rogers (2009), as esteiras geradas por turbinas eólicas são comumente classificadas em duas regiões distintas: esteira próxima e esteira distante, a diferença entre elas está relacionada à distribuição espacial e à intensidade da turbulência presente no campo de escoamento. Estudos numéricos e experimentais demonstram que cada pá da turbina forma uma camada de vórtices, que é conduzida ao longo da esteira pela combinação do escoamento axial médio e do escoamento rotacional. Além dos vórtices originados na borda de fuga das pás, há também vórtices gerados no cubo da turbina e, de forma mais significativa, vórtices intensos nas pontas das pás, que são transportados a jusante. Esses vórtices de ponta são responsáveis pelas chamadas perdas de ponta, que afetam diretamente o desempenho aerodinâmico e a eficiência da turbina.

Na região próxima à turbina (entre uma e três vezes o diâmetro do rotor), os vórtices e a turbulência gerada mecanicamente são dissipados e misturados, promovendo a difusão da vorticidade e da turbulência originadas no rotor. Esse processo resulta em uma distribuição mais uniforme da turbulência e em perfis de velocidade mais homogêneos na esteira distante. Simultaneamente, o escoamento axial mais lento da esteira interage com o escoamento livre, reenergizando gradualmente o fluxo. Os vórtices gerados nas pontas das pás formam uma região anular na esteira distante, caracterizada por maior intensidade turbulenta em torno de um núcleo central menos turbulento. A mistura e difusão continuam ao longo da esteira até que a turbulência induzida pela turbina e o déficit de velocidade em relação ao escoamento livre sejam completamente dissipados (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Em parques eólicos, o escoamento do ar é marcado pela presença e sobreposição de diversas esteiras turbulentas geradas devido a operação das turbinas. Essas esteiras podem provocar perdas no aproveitamento do potencial eólico que podem chegar a até 20% da energia total disponível. Ainda segundo estudo, as turbinas eólicas que estão dentro de um parque eólico podem apresentar uma redução de até 40% na potência gerada, quando comparadas com turbinas operando isoladamente. Essa perda se dá justamente pela interferência aerodinâmica causada pelas esteiras das turbinas vizinhas. Para além dos efeitos na eficiência da turbina, também são encontrados problemas de fadiga, associados à turbulência, uma vez que esta tem influência direta sobre forças e momentos atuantes nas pás da turbina (WITTWER et al., 2016).

2.4 Simulação Computacional

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é uma técnica utilizada para prever o escoamento complexo de fluidos em máquinas de fluido. O CFD é uma ferramenta economicamente viável, que utiliza a metodologia de volumes finitos, na qual o domínio do fluido é discretizado em elementos para simular numericamente o escoamento. (NILUGAL; KARANTH;

MADHWESH, 2020)

2.4.1 Impotância da Simulação

O CFD tornou-se indispensável em diversas áreas da ciência e da engenharia. Ao resolver as equações fundamentais que regem o movimento dos fluidos é possível prever o comportamento do fluido em diferentes condições, tornar o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e otimizar o desempenho em múltiplas indústrias. A dinâmica dos fluidos computacional tem capacidade de simular escoamentos com alto nível de detalhamento, permitindo a análise de diversos parâmetros, como temperatura, velocidade, pressão e concentração. As simulações CFD ajudam a prever desempenhos e a otimizar projetos muito antes da construção de protótipos físicos, se tornando uma ferramenta essencial para minimizar custos e lidar com fenômenos de escoamento complexos, que seriam difíceis de estudar por meio de experimentos práticos (CHOWDHURY, 2024)

2.4.2 Modelos matemáticos e computacionais aplicados

De acordo com Çengel e Cimbala (2007), o processo de simulação em CFD envolve diversas etapas fundamentais para garantir a confiabilidade dos resultado:

- a) Geração da malha: inicialmente, é realizada a geração da malha, considerada uma das fases mais críticas, já que sua qualidade influencia diretamente na precisão da solução. Nesta etapa, é crucial realizar uma análise de independência de malha, onde são feitas simulações com diferentes resoluções até que os resultados se tornem praticamente invariáveis, desse modo, garante-se que a solução a partir daquele ponto é independente da malha.
- b) Definição das condições de contorno: em seguida, definem-se as condições de contorno de acordo com a natureza do problema, como velocidade ou pressão nas fronteiras de entrada e saída, e condição de não escorregamento nas paredes.
- c) Definição das propriedades do fluido: as propriedades do fluido, como densidade e viscosidade são especificadas conforme o material em estudo.
- d) Parâmetros numéricos e algoritmos de solução: posteriormente, são definidos os parâmetros numéricos e algoritmos de solução, além dos valores iniciais para as variáveis do escoamento, essenciais para iniciar o processo iterativo. O cálculo é realizado de forma iterativa, com monitoramento dos resíduos, que indicam a proximidade da convergência. A convergência é atingida quando os resíduos se estabilizam e as variáveis deixam de apresentar variações significativas.

- e) Pós-processamento: por fim, após a convergência, realiza-se o pós-processamento, com a obtenção de propriedades globais, como forças de arrasto e sustentação, além da visualização de campos de velocidade e pressão, permitindo análises detalhadas para suporte ao projeto.

2.4.3 Índice de convergência de malha (GCI)

O *Grid Convergence Index* (GCI) foi proposto como forma padronizada de relatar estudos de independência de malha. Esse método utiliza uma abordagem objetiva e assintótica para quantificar a incerteza associada à convergência da malha, derivada da teoria da extrapolação de Richardson.

Em estudos de refinamento de malha, diferentes autores usam diferentes métodos (de primeira, segunda, terceira ordem...) e diferentes razões de refinamento, o que torna difícil comparar os resultados diretamente. O GCI resolve isso ao normalizar o erro estimado para uma condição padrão: como se todos os estudos tivessem usado um método de segunda ordem e duplicado a malha. Assim, mesmo que os métodos e refinamentos sejam diferentes, o GCI permite comparar os níveis de convergência (ROACHE, 1994).

De acordo com Ali, Doolan e Wheatley (2009) e Roache (1994), a fórmula geral para o cálculo do GCI entre duas malhas (uma fina e uma grossa) é dada pela equação 5:

$$GCI = F_s \frac{|\epsilon|}{r^p - 1} \quad (5)$$

Onde:

- F_s - Fator de segurança (garante que a banda de erro seja conservadora), $F_s=1,25$, quando são usadas três malhas (WILCOX, 2006);
- (ϵ) - É o erro relativo entre as soluções das duas malhas, calculado como $(f_{fina} - f_{grossa})/f_{fina}$, onde f é o resultado físico da simulação.
- r - É a taxa de refinamento da malha.
- p - É a ordem de convergência do método.

O GCI é uma estimativa de erro válida se as soluções das diferentes malhas estiverem dentro da faixa assintótica, ou seja, para que o GCI seja considerado bom, deve se observar se a solução se comporta de forma suave e previsível conforme a malha é refinada e cabe ao engenheiro decidir se a percentagem de erro encontrada é aceitável para o problema em questão.

2.4.4 Modelos de turbulência

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a maioria dos escoamentos de interesse na engenharia apresenta comportamento turbulento, o que torna o estudo desse regime não apenas uma questão teórica. Assim, engenheiros de fluidos necessitam de ferramentas adequadas e viáveis que permitam representar de forma realista os efeitos da turbulência. Os métodos numéricos para capturar esses efeitos são agrupados em três categorias: Modelo de turbulência RANS - *Reynolds-averaged Navier–Stokes*, LES - *Large Eddy Simulation* e DNS - *Direct Numerical Simulation*. No entanto, a grande maioria dos cálculos de escoamentos turbulentos é realizada utilizando o modelo (RANS), isso porque o LES e DNS exigem uma alta demanda por recursos computacionais, tanto em armazenamento quanto em volume de cálculos e para a maioria das aplicações de engenharia, não é necessário resolver os detalhes das flutuações turbulentas.

Ainda segundo Versteeg e Malalasekera (2007), no método RANS, as equações de Navier-Stokes são calculadas em média no tempo, porém, termos extras aparecem nas equações de movimento do fluido, devido às interações entre várias flutuações turbulentas. Para conseguir resolver as equações, esses termos extras são modelados com modelos de turbulência.

Segundo Vergel (2013), o modelo de turbulência $k-\epsilon$ (*k-épsilon*) é um dos modelos mais comumente utilizados, sendo empregado em escoamentos com elevados número de Reynolds e ampla faixa de turbulência. Esse modelo considera uma turbulência isentrópica. O modelo insere duas novas variáveis ao sistema original (Navier-Stokes): a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação de turbulência (ϵ), ambas utilizadas para o cálculo da viscosidade turbulenta.

Outro modelo de duas variáveis bastante utilizado é o $k-\omega$ padrão, que sofreu diversas alterações ao longo dos anos. De modo geral esse modelo fundamenta-se em equações de transporte para duas variáveis principais: a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação específica (ω) (WILCOX, 2006). Esse modelo engloba correções para efeitos de baixo número de Reynolds, compressibilidade e espalhamento de escoamentos com cisalhamento, sendo adequado para escoamentos limitados por paredes e escoamentos livres com cisalhamento (ANSYS Inc., 2009)

Vergel (2013) também destaca o modelo SST (*Shear Stress Transport*), proposto por Menter (1994), esse modelo considera o efeito da tensão de cisalhamento na região próxima à parede, o que melhora a capacidade de prever o descolamento do fluxo. Além disso, o SST combina vantagens dos modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$, sendo o primeiro mais eficiente na descrição da camada limite turbulenta perto da parede, onde as velocidades são baixas e o segundo mais adequado para regiões afastadas da parede e escoamentos de alto número de Reynolds, onde predominam altas velocidades. Para realizar essa combinação, o SST utiliza funções de mistura (*Blend Functions*) que ativam o modelo mais apropriado de acordo com a posição no escoamento.

3 METODOLOGIA

A seção a seguir apresenta a metodologia desenvolvida para este estudo, descrevendo os procedimentos utilizados para alcançar os objetivos propostos.

3.1 Classificação da pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, de natureza qualitativa, fundamentada no método hipotético-dedutivo. tal método permite a formulação de hipóteses com base em referenciais teóricos previamente estabelecidos, que são posteriormente testadas por meio de simulações computacionais. A ferramenta utilizada para a validação computacional será o software ANSYS, amplamente reconhecido na área de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Este trabalho consiste em investigar a influência do número de pás na intensidade da turbulência e na formação da esteira aerodinâmica gerada por turbinas eólicas de eixo horizontal, além disso, verificar o comportamento do arrasto do torque com essa mudança. Para isso, foi realizada uma revisão teórica abrangente, contemplando conceitos fundamentais de aerodinâmica, escoamento turbulento e modelagem computacional. Complementarmente, foram conduzidas simulações numéricas utilizando técnicas de CFD, com o intuito de reproduzir o comportamento do escoamento ao redor das turbinas em diferentes cenários de velocidade do vento, considerando este sempre perpendicular ao rotor da turbina.

A abordagem adotada permite não apenas quantificar o impacto do número de pás sobre a força de arrasto e os padrões de turbulência, mas também compreender mecanismos físicos que governam a interação entre o fluxo de ar e os componentes da turbina. Os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento do projeto aerodinâmico de turbinas eólicas, visando maior eficiência energética e menor impacto ambiental.

3.2 Definição do Método

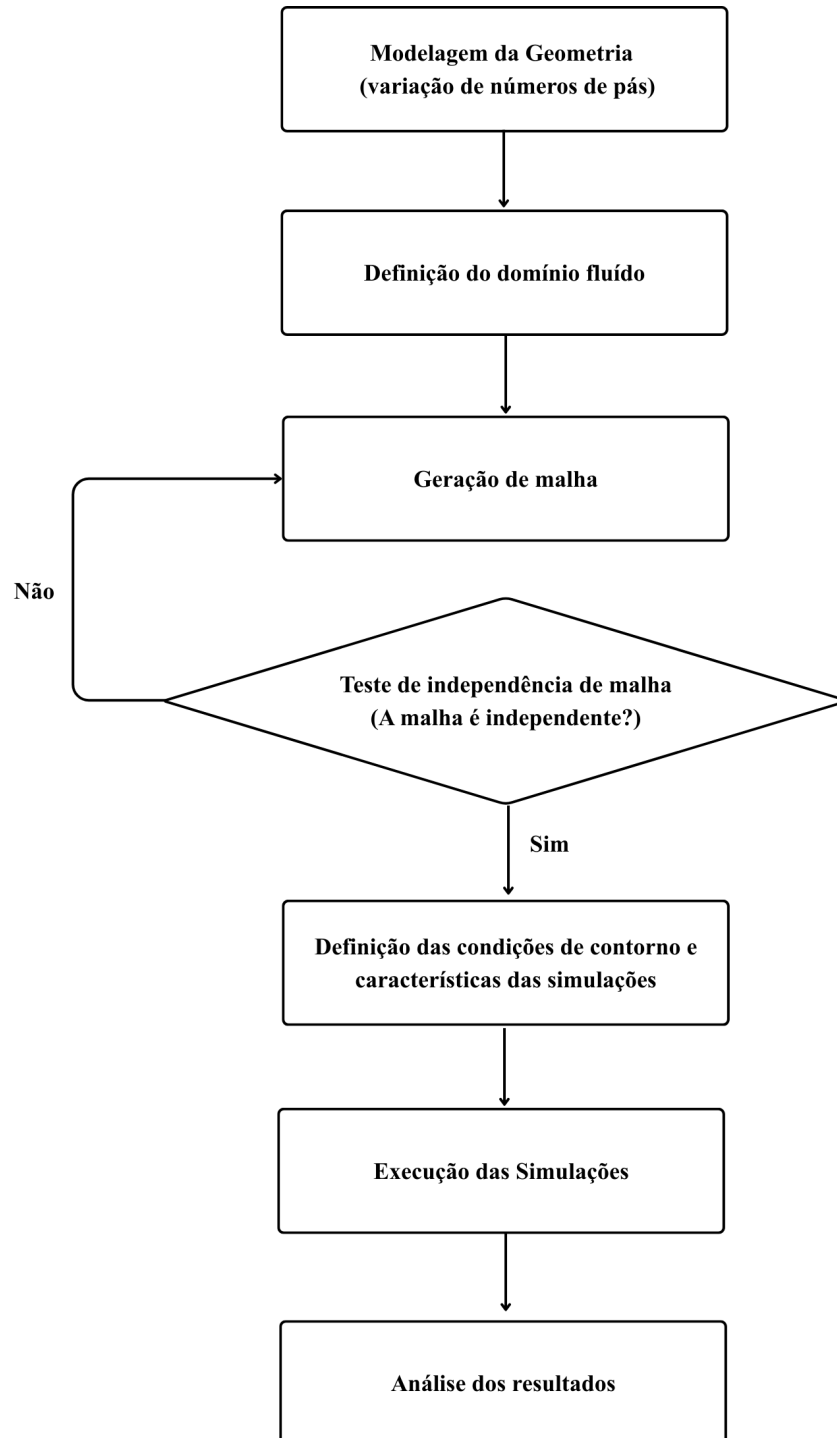
A metodologia foi desenvolvida em etapas, abrangendo desde a criação da geometria e definição do domínio computacional até o pós-processamento dos dados.

Inicialmente, procedeu-se à criação da geometria do rotor e de seus componentes associados, assegurando a representação fiel das condições físicas do problema. Em seguida, foi realizada a definição do domínio computacional, etapa fundamental para delimitar a região de escoamento. Posteriormente, foram aplicadas as condições de contorno e parâmetros de simulação, incluindo a escolha do modelo de turbulência mais adequado para capturar os fenômenos relevantes. Na sequência, o processo envolveu a geração e refinamento da malha, com atenção especial às regiões próximas às pás e ao cubo, como estratégia computacional. Após a etapa de discretização, foram conduzidas as simulações numéricas, permitindo a obtenção dos campos de velocidade e viscosidade turbulenta. Por fim, o pós-processamento dos dados foi realizado de maneira sistemática, com a extração de grandezas de interesse, como torque, arrasto e distribuição

da turbulência, além da elaboração de gráficos e contornos que facilitam a interpretação dos resultados.

Para melhor compreensão a sequência de procedimentos adotados estão apresentados na figura 7 que sintetiza o fluxo metodológico.

Figura 7– Fluxograma do trabalho.



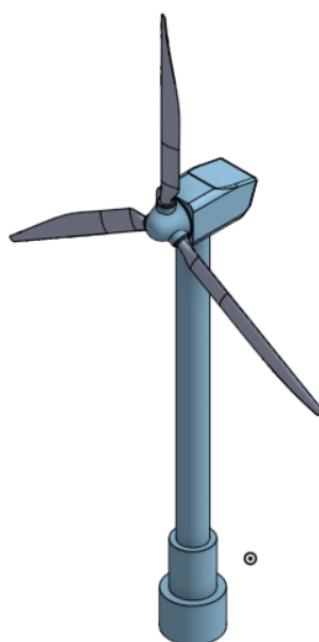
Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1 Modelagem da turbina

As simulações foram realizadas considerando diferentes configurações geométricas de turbinas horizontais, variando o número de pás entre duas, três, quatro e cinco unidades, mantendo constante o diâmetro do rotor e a velocidade de entrada do vento.

O projeto de construção tridimensional foi baseado em modelo desenvolvido e empregado em trabalhos do Labflu (laboratório de fluídos) da Universidade Federal de Pernambuco. O desenho 3D foi adaptado para o presente estudo utilizando o software Onshape, uma plataforma avançada de CAD baseada em nuvem que possibilitou a criação da geometria e a implementação das alterações necessárias. As modificações realizadas concentraram-se especificamente no número de pás da turbina. A figura 8 apresenta a vista isométrica do desenho 3D completo da turbina com três pás.

Figura 8– Modelo 3D da turbina - três pás.



Fonte: Autoria própria (2025)

As principais dimensões físicas da turbina eólica utilizadas neste estudo estão mostradas na tabela 1. Nela, são apresentados parâmetros fundamentais como o diâmetro do rotor, o comprimento das pás, a altura da torre e a altura total do sistema. Esses dados são essenciais para compreender o porte da turbina, sua capacidade de captação de energia cinética do vento e sua adequação ao ambiente de instalação.

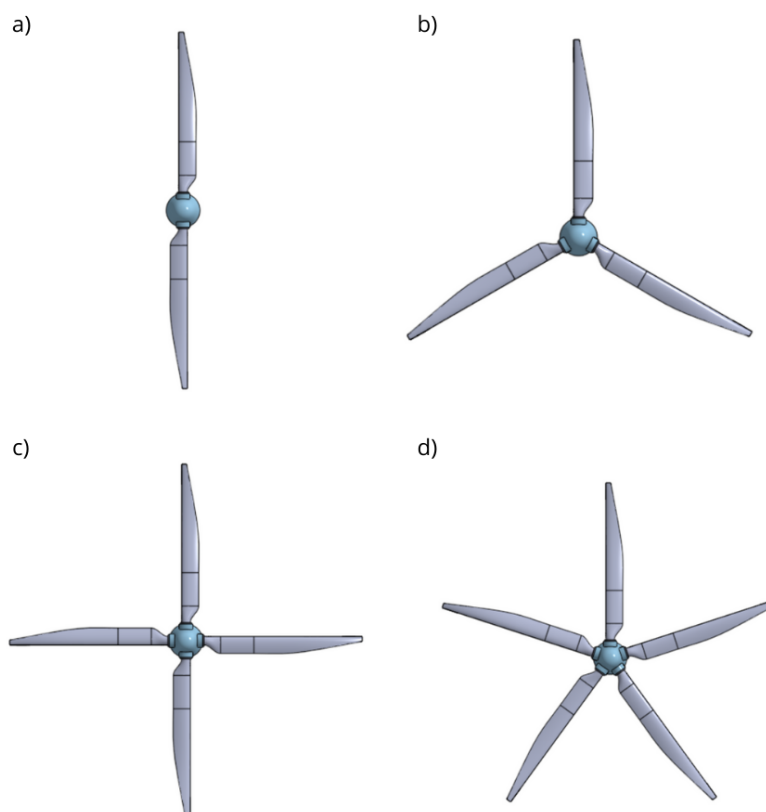
Tabela 1– Dimensões da turbina eólica

Parâmetro	Valor
Diâmetro do rotor	21,6 m
Comprimento da pá	9,5 m
Altura da torre	20,4 m
Altura total	32,11 m

Fonte: Autoria própria (2025)

Além da vista isométrica apresentada na Figura 8, foram gerados modelos tridimensionais adicionais da turbina com diferentes números de pás. A figura 9 ilustra as variações geométricas consideradas nas simulações, apresentando os modelos tridimensionais da turbina com diferentes números de pás.

Figura 9– Modelos tridimensionais da turbina com diferentes números de pás: (a) duas pás, (b) três pás, (c) quatro pás, (d) cinco pás.



Fonte: Autoria própria (2025)

Em cada configuração, as pás foram distribuídas de forma equidistante ao redor do eixo de rotação, formando ângulos regulares entre si: 180° , 120° , 90° e 72° , respectivamente.

3.2.2 Domínio computacional e teste de independência de malha

A definição das dimensões do domínio computacional foi realizada com o objetivo de garantir que as condições de contorno artificiais (paredes do domínio) não exercessem influência sobre o escoamento ao redor da geometria estudada. Em simulações de escoamento externo, domínios excessivamente restritos podem induzir erros numéricos significativos (BLOCKEN, 2015). Para mitigar estes erros, foi considerado como referência o comprimento da pá (c), logo, definiu-se um comprimento equivalente a 4 vezes o tamanho da pá a montante, a partir da ponta do cubo e 7 vezes a jusante, imediatamente atrás da turbina. A altura e largura foram definidas como 4 vezes o tamanho da pá acima e 4 vezes abaixo do rotor e largura igual a 4 vezes o tamanho da pá para cada lado.

A figura 10 mostra uma foto com o esquemático das distâncias no volume de controle adotado.

Figura 10– Domínio computacional

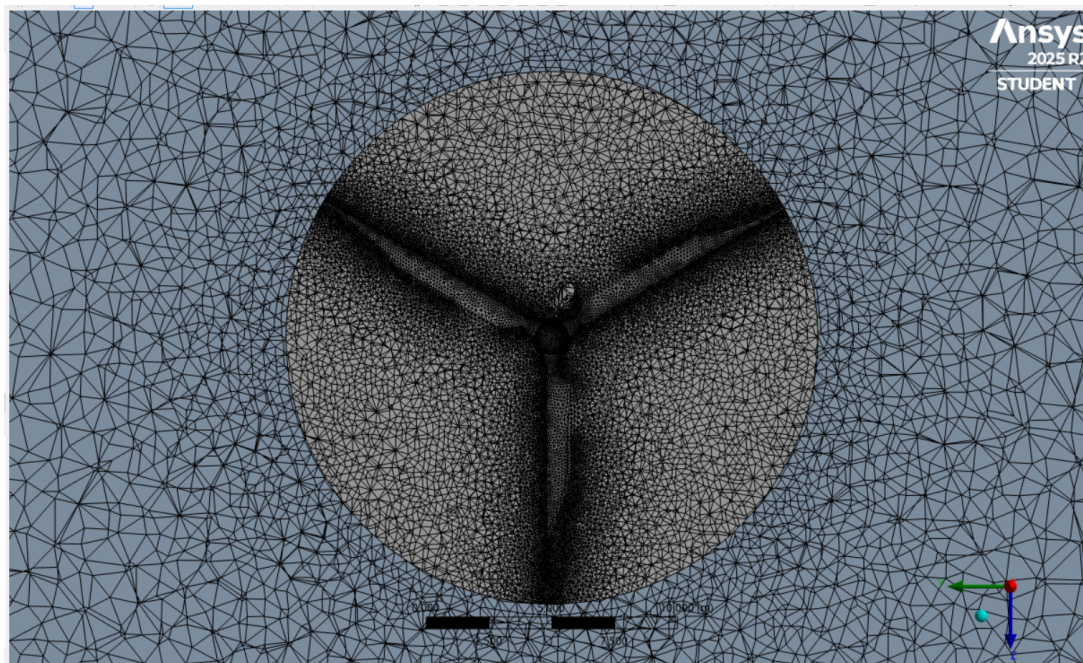


Fonte: Autoria própria (2025)

O domínio computacional foi estruturado com malha refinada na região próxima às pás, onde ocorrem variações significativas de velocidade e pressão, além da formação do escoamento turbulento. Essa estratégia de refinamento local tem como objetivo tentar representar fielmente as condições físicas do escoamento ao redor das turbinas eólicas, o que permitiria capturar com maior precisão gradientes de escoamentos e os efeitos associados à separação do fluxo e geração de vórtices.

O refinamento da malha foi implementado de forma progressiva, com transição suave entre as regiões de alta e baixa densidade de elementos, evitando descontinuidades que possam comprometer a estabilidade da simulação. A figura 11 mostra um exemplo de malha gerada para o estudo.

Figura 11– Malha computacional



Fonte: Autoria própria (2025)

Com objetivo de verificar a sensibilidade dos resultados em relação à discretização espacial do domínio computacional, foi realizado o teste de independência de malha, considerando o rotor com três pás. Para isso, foram geradas e comparadas três configurações distintas de malha: uma malha fina, uma malha média e uma malha grossa. A escolha dessas malhas foi condicionada pelas limitações impostas pela versão estudantil do software ANSYS 2025 R2, que permite a geração de até 1 milhão de elementos por projeto (ANSYS, 2025). Essa restrição técnica foi determinante para o dimensionamento da malha mais refinada, impedindo o uso de configurações ainda mais densas que poderiam aumentar a precisão dos resultados.

Como parâmetro de entrada para as simulações, foi adotada a velocidade do vento de 7,35 m/s, representando uma condição média típica observada no estado de Pernambuco, conforme indicado por EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2025). Essa escolha visa garantir a representatividade dos resultados em relação às condições reais de operação de turbinas eólicas na região.

Os valores correspondentes ao número de elementos utilizados em cada malha e os respectivos resultados de força de arrasto (*drag*) obtidos nas simulações permitiram a análise comparativa entre os diferentes níveis de refinamento. A partir desses dados, foi possível avaliar a convergência dos resultados e verificar se a malha utilizada é suficientemente precisa para representar o fenômeno físico em questão, presumindo que as variações observadas nas simulações sejam atribuídas às condições físicas do problema e não às limitações da discretização espacial.

De modo a quantificar a incerteza de discretização na força de arrasto, ou seja, o erro introduzido pela malha computacional no processo de simulação, foi realizado o cálculo do

Índice de Convergência de Malha (GCI), conforme metodologia proposta por (ROACHE, 1994), utilizando a equação 5. Esse índice é amplamente utilizado em estudos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) como uma ferramenta padronizada para estimar a confiabilidade dos resultados numéricos obtidos a partir de diferentes níveis de refinamento de malha. O método do GCI fornece uma abordagem assintótica, sistemática e objetiva para a quantificação da incerteza de convergência, permitindo avaliar o grau de aproximação da solução numérica em relação à solução exata do problema físico. Essa abordagem baseia-se na teoria generalizada da Extrapolação de Richardson, que considera o comportamento da solução em função do tamanho dos elementos da malha, assumindo que o erro de discretização diminui de forma previsível à medida que a malha é refinada.

Para aplicar o GCI, foram utilizadas as três malhas e os resultados de força de arrasto obtidos em cada uma delas foram comparados. A partir desses valores, foi possível calcular o erro relativo entre as soluções, o fator de refinamento entre as malhas e, por fim, o índice GCI, que expressa a incerteza percentual associada à discretização. Esse procedimento é essencial para validar a consistência dos resultados e tentar garantir que as variações observadas nas simulações não sejam decorrentes de limitações numéricas, mas sim de fenômenos físicos reais.

A partir dos resultados do GCI, escolheu-se a malha para prosseguir com as simulações. Essa escolha da malha considerou não apenas o valor do GCI, mas também aspectos como o custo computacional e tempo de processamento. O número de elementos da malha escolhida foi replicada para as outras geometrias.

3.2.3 Condições de contorno e propriedades do fluido.

O ar, fluido de trabalho das turbinas eólicas, teve comportamento assumido como incompressível, sendo admitido com densidade e viscosidade constantes de $1,225 \text{ kg/m}^3$ e $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ respectivamente.

As condições de contorno foram definidas de modo a representar o escoamento atmosférico em torno da turbina. As superfícies das pás foram modeladas como paredes com condição de não deslizamento. Na entrada do domínio, foi aplicada a condição de *Velocity Inlet*, definindo-se a velocidade e a direção do fluxo incidente. Em contrapartida, para a fronteira de saída, adotou-se a condição de *Outflow*. Esta escolha se justifica pelo desconhecimento a priori da distribuição de pressão e velocidade a jusante da turbina, assumindo-se que o escoamento nesta região encontra-se plenamente desenvolvido, condição esta que é compatível com o regime incompressível e o uso de entrada de velocidade prescrita (BAKKER, 2002).

De modo a representar diferentes cenários de escoamento atmosférico em torno da turbina e compreender melhor a influência da velocidade do vento no torque e arrasto, foram feitas simulações considerando cinco velocidades de vento distintas: 6 m/s, 7,35 m/s, 8 m/s, 9 m/s e 10 m/s.

3.2.4 Modelo de turbulência

O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*), uma vez que esse modelo combina a robustez do $k-\epsilon$ em regiões afastadas das paredes com a precisão do $k-\omega$ nas regiões próximas a parede, o que torna o modelo adequado para a análise da turbulência e da esteira gerada por turbinas eólicas, combinando boa precisão com um custo computacional menor. Além disso, estudos como o de Neto (2017) corroboram ainda mais para o uso do modelo, quando ele afirma que os resultados obtidos se mostraram compatíveis com valores experimentais.

3.2.5 Análise dos resultados

Para a avaliação da influência do número de pás na intensidade da turbulência, os dados obtidos nas simulações foram processados utilizando o software ANSYS CFD-Post. Para realizar a análise dos resultados, foram feitas secções no domínio fluído em planos estratégicos de modo a facilitar a visualização do impacto das estrutura do rotor no fluído.

A primeira análise se deu no plano longitudinal ZX, posicionado no centro do rotor e alinhado com a direção do vento livre, para observar a recuperação da velocidade ao longo do comprimento do domínio. Foi feito ainda um corte no plano horizontal XY, considerando que a turbina é tridimensional e, portanto, requer observação em diferentes cortes para melhor compreensão do escoamento. Este último plano também foi pego no centro do rotor, observando a recuperação de velocidade a jusante do rotor.

Foram feitos ainda planos transversais, posicionados a distâncias normalizadas a jusante do rotor ($C/2$, $2C$ e $5C$, onde C é o comprimento da pá da turbina), permitindo a visualização do contorno de viscosidade turbulenta e como ele se comporta à medida que se afasta do rotor.

O torque foi extraído após a conclusão da simulação computacional, ele foi pego na região do rotor, considerando o eixo x, que corresponde ao eixo de rotação da turbina.

4 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita, a qual envolveu revisão teórica, modelagem tridimensional das turbinas eólicas e simulações numéricas em CFD. A análise dos resultados segue a ordem das etapas estabelecidas, contemplando inicialmente a avaliação da influência do número de pás na formação da esteira aerodinâmica e na intensidade da turbulência utilizando como condição de contorno uma velocidade do vento de 7.35 m/s. Em seguida, são discutidos os efeitos das diferentes condições de velocidade do vento, e os efeitos no arrasto e no torque nas turbinas.

4.1 Teste de independência de malha e GCI

A tabela 2 apresenta o número de elementos utilizados para verificação da independência da malha e os respectivos resultados de arrasto.

Tabela 2- Dados de arrasto para diferentes números de elementos de malha

Número de pás	Número de elementos	Arrasto (N)
3	692158	1223,1831
3	815585	1220,1182
3	915199	1220,0139

Fonte: Autoria própria (2025)

A partir dos dados expostos, percebe-se que os valores da solução variam muito pouco entre si, principalmente entre a malha que tem um refinamento mais fino e a de refinamento médio, o que representa uma precisão que independe do tamanho da malha.

A taxa de refinamento de malha foi calculada, com intuito de ser usada no GCI, esta taxa pode ser vista na tabela 3

Tabela 3- Taxa de refinamento de malha

Relação de malha	r_1
Malha fina/Malha média	1,063
Malha média/ Malha grossa	1,056

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados obtidos a partir do cálculo do Índice de Convergência de Malha (GCI) estão organizados na tabela 4.

Tabela 4- Resultado do GCI

Malha	Número de elementos	Arrasto (N)	Erro Relativo (ε)	GCI (%)
Grossa (f_3)	692158	1223,1831	–	–
Média (f_2)	815585	1220,1182	0,25%	2,71%
Fina (f_1)	915199	1220,0139	0,00855%	0,081%

Fonte: Autoria própria (2025)

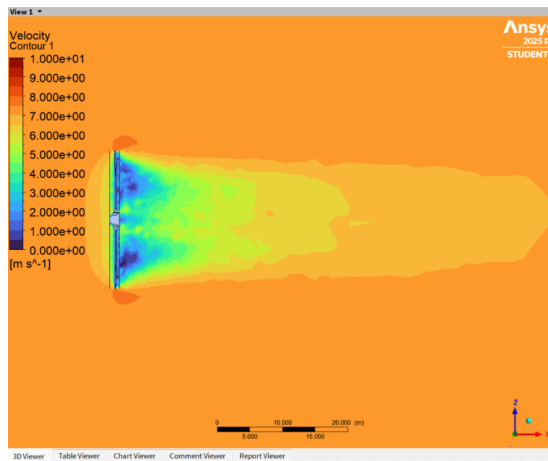
A análise revelou um índice GCI de 0,08% para a malha fina, que indica uma baixa incerteza de discretização e que a solução numérica entrou na região assintótica. Esse teste corrobora para conclusão de que a solução é independente da malha, e a incerteza numérica associada à discretização espacial é desprezível para os fins desta análise. A partir disso, foi possível escolher a malha média (815585 elementos) a ser utilizada nas simulações, a escolha levou em conta o baixo índice GCI e o custo computacional, sendo possível obter resultados coerentes em menos tempo e com menor esforço computacional.

4.2 Influência do número de pás na turbulência

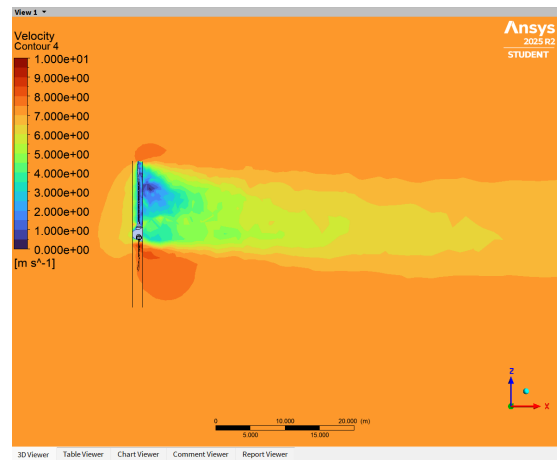
As figuras 12 e 13 ilustram os contornos de velocidade obtidos para os diferentes números de pás analisados. Esses resultados são apresentados em duas perspectivas complementares: nas seções longitudinais (plano XZ) e nas seções horizontais (plano XY).

Figura 12– Contornos de velocidade das simulações com duas e três pás

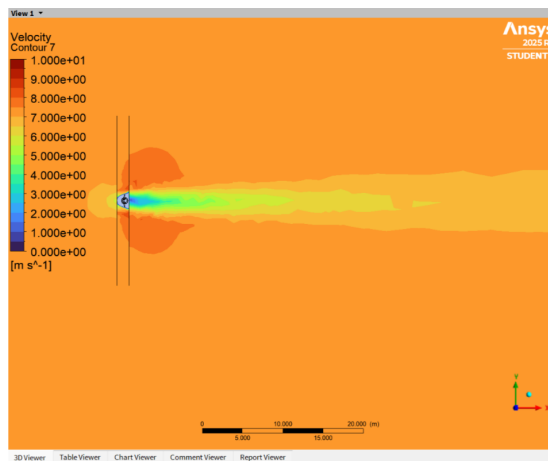
a) 2 pás, XZ



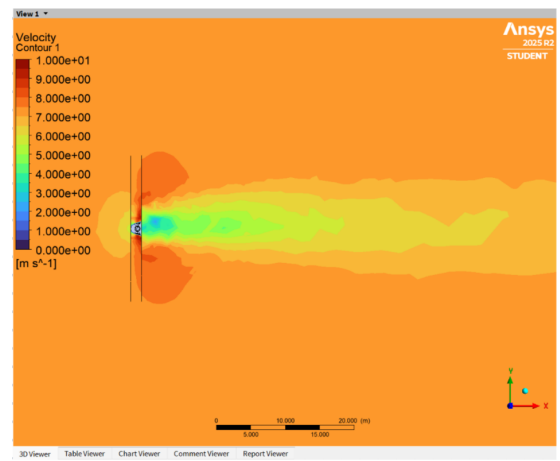
c) 3 pás, XZ



b) 2 pás, XY



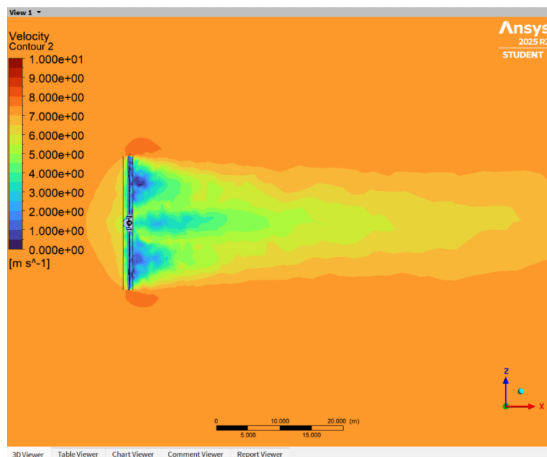
d) 3 pás, XY



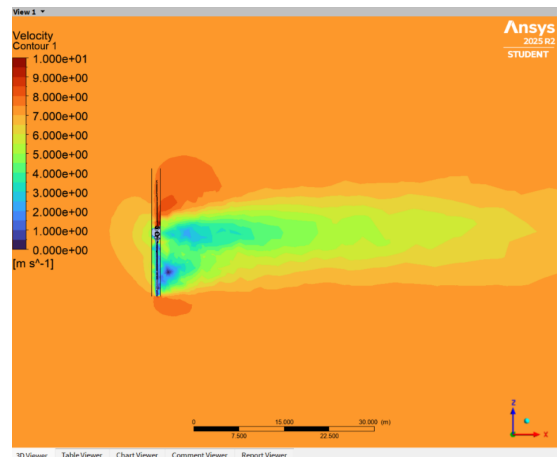
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 13– Contornos de velocidade das simulações com quatro e cinco pás

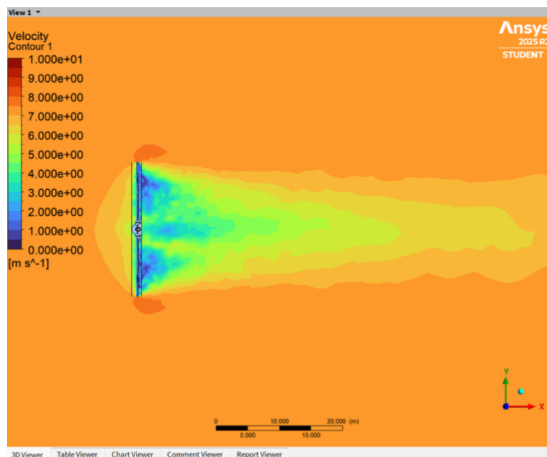
a) 4 pás, XZ



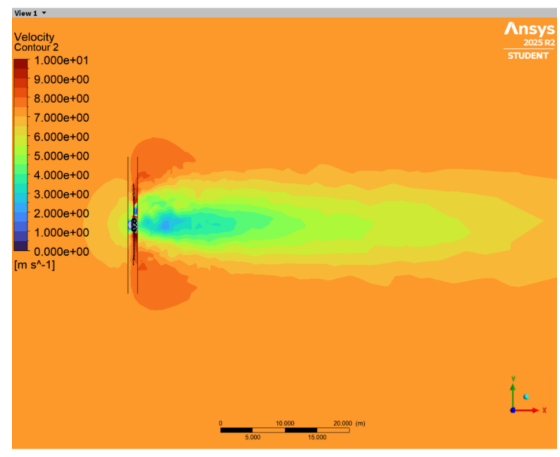
c) 5 pás, XZ



b) 4 pás, XY



d) 5 pás, XY



Fonte: Autoria própria (2025).

As Figuras 12 a) e b) apresentam os contornos de magnitude de velocidade para o rotor de duas pás. No plano longitudinal (XZ), alinhado com as pás, observa-se que a perturbação no escoamento se estende por todo o diâmetro do rotor. Já no plano horizontal (XY), percebe-se a influência concentrada na região central, sendo atribuída principalmente à presença do cubo. Em ambas as figuras, destaca-se o intenso gradiente de velocidade, evidenciado pela proximidade entre as zonas de alta magnitude (regiões alaranjadas) e as de baixa velocidade (regiões azuladas), este gradiente é um forte indicativo de vorticidade. Presume-se, portanto, que a perturbação da velocidade do fluido é estreita em largura mas grande em altura.

Para a configuração de três pás, mostrada na figura 12 c), é possível ver que a perturbação da magnitude da velocidade no plano XZ acontece com uma altura um pouco maior que a metade do rotor. Este plano está justamente alinhando com uma das pás, que juntamente com o cubo gera o efeito de diminuição da velocidade imediatamente à jusante. Na região inferior do rotor, apresentada nesse corte, onde não há presença de pá, identifica-se uma área de aumento de velocidade localizada entre duas pás, evidenciando um elevado gradiente de velocidade. No corte no plano XY, ilustrado na figura 12 d), nota-se que a esteira apresenta espessura levemente maior em comparação à configuração de duas pás para o mesmo plano. Esse efeito é resultado da interação entre o ar com o cubo e a pá, esta última posicionada perpendicularmente ao plano.

A esteira formada pela turbina com quatro pás é alta e larga, como pode ser observado nas figuras 13 a) e b). Além disso, o vento é influenciado pela turbina um pouco antes em comparação com as duas anteriores.

Por fim, o contorno de velocidade da turbina com cinco pás pode ser visto na figura 13 c) e d). O plano XZ está alinhado com a orientação de uma das pás, o que justifica a diminuição da velocidade na região inferior do rotor. Na região superior, observa-se um aumento da velocidade, resultado da aceleração do escoamento que ocorre entre duas pás. Já no plano XY, identifica-se uma pá posicionada perpendicularmente ao corte, cujo efeito é a redução da velocidade na esteira. Nas bordas do rotor, por outro lado, verifica-se a aceleração do fluxo devido ao espaçamento existente entre as pás.

Como título de comparação, observa-se que, à medida que o número de pás aumenta, a recuperação da velocidade na esteira próxima torna-se mais gradativa e prolongada. Esse comportamento está diretamente relacionado à maior interação entre o escoamento e as superfícies das pás, o que intensifica a dissipação de energia e amplia a região de déficit de velocidade imediatamente a jusante do rotor. Em configurações com menor número de pás, a esteira tende a ser mais estreita e a recuperação da velocidade ocorre de forma relativamente rápida, devido ao maior espaçamento entre as pás e à menor obstrução ao fluxo. Já em turbinas com maior número de pás, a esteira apresenta maior espessura e persistência, evidenciando um atraso significativo na recomposição do perfil de velocidade. É importante destacar que todos esses resultados foram obtidos considerando a turbina simulada em condição parada, ou seja, sem rotação das pás. Nessa situação, os efeitos observados decorrem exclusivamente da obstrução geométrica das pás e do cubo sobre o escoamento, sem a influência de fenômenos adicionais associados

ao movimento rotacional. Essa condição de simulação permite isolar o impacto puramente geométrico do número de pás na formação da esteira e na recuperação da velocidade, fornecendo uma base comparativa fundamental para análises posteriores em regime de operação real.

A figura 14 ilustra o campo de viscosidade turbulenta, essencial para a análise da esteira (*wake*). Como citado na metodologia, foram feitos planos transversais, posicionados a distâncias normalizadas a jusante do rotor, de modo a visualizar o comportamento da viscosidade turbulenta por todo comprimento da esteira.

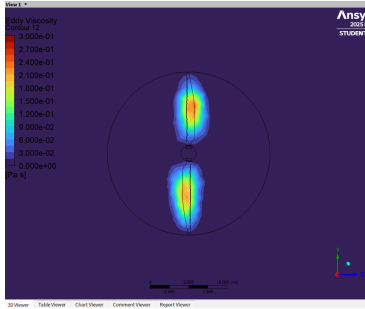
A *Eddy viscosity* pode ser traduzida como a viscosidade turbulenta, ela representa a intensidade da mistura da massa de ar, onde as regiões mais alaranjadas possuem uma turbulência maior. A análise da Figura 14 permite estabelecer uma relação entre o número de pás do rotor e a intensidade da viscosidade turbulenta gerada na esteira. Conforme observado nas simulações, existe uma relação inversa entre essas variáveis: quanto menor o número de pás, maiores são os picos de intensidade da turbulência, representados pelas zonas de coloração alaranjada e avermelhada. Em contrapartida, à medida que se aumenta o número de pás a turbulência torna-se de menor magnitude máxima (predominância de cores azul e verde claro). Com isso, presume-se que com mais pás, a carga aerodinâmica é fracionada entre mais elementos, gerando vórtices individuais mais fracos, além disso, a proximidade física entre as pás facilita a interação e a mistura precoce desses vórtices logo na saída do rotor.

A análise dos gráficos de viscosidade turbulenta revela também a forte influência do número de pás na geometria inicial da esteira. Rotores com mais pás criam um padrão de turbulência inicial mais uniforme, caracterizado por uma esteira com múltiplas pontas. Em contraste, rotores com menos pás concentram a turbulência em locais mais separados.

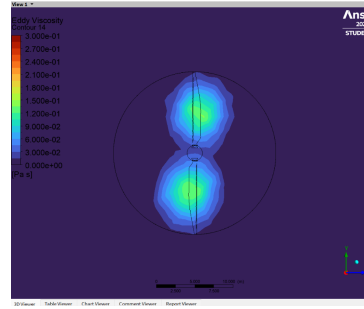
Nota-se ainda que à medida que o escoamento se afasta da turbina, ele tende a se dissipar e aumentar a área afetada. Analisando a evolução do fluxo a jusante percebe-se o processo de dissipação e expansão da esteira. Nos rotores com maior número de pás (4 e 5), a esteira atinge uma geometria circular mais rapidamente. Já no rotor de 2 pás, a forma visual do rotor persiste por uma distância maior, mantendo a forma alongada verticalmente antes de se misturar completamente com o fluxo livre. Portanto, pressupõe-se que rotores com maior número de pás promovem uma homogeneização mais rápida da esteira, enquanto rotores com poucas pás geram perturbações mais localizadas e intensas.

Figura 14– Planos de viscosidade turbulenta a diferentes distâncias

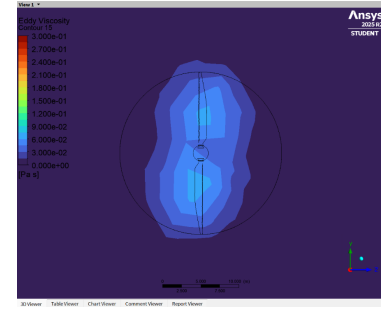
a) 2 pás - metade do comprimento da pá à jusante do rotor



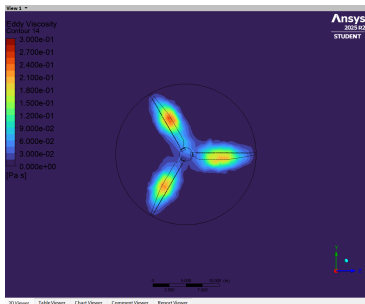
b) 2 pás - duas vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



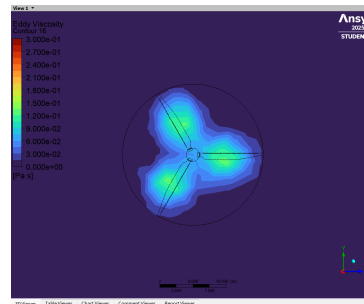
c) 2 pás - cinco vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



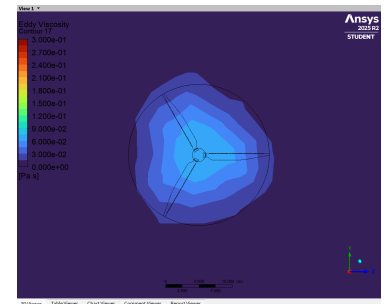
d) 3 pás - metade do comprimento da pá à jusante do rotor



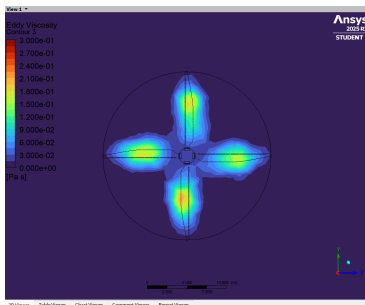
e) 3 pás - duas vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



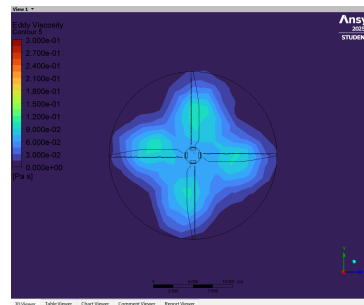
f) 3 pás - cinco vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



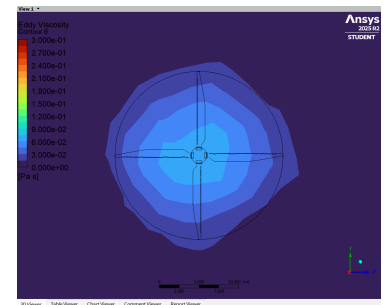
g) 4 pás - metade do comprimento da pá à jusante do rotor



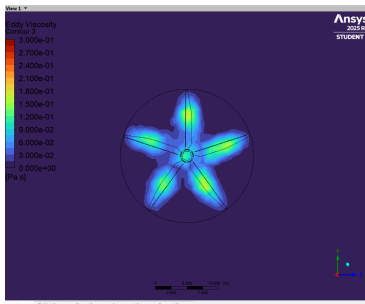
h) 4 pás - duas vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



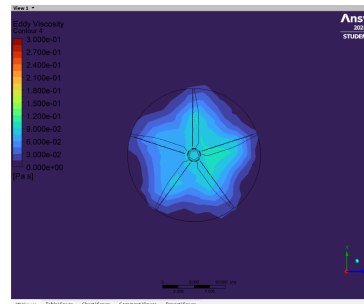
i) 4 pás - cinco vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



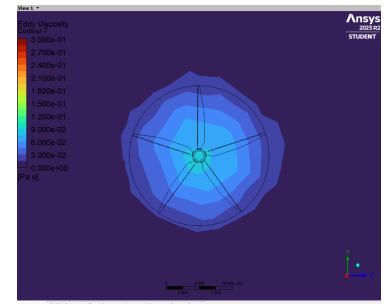
j) 5 pás - metade do comprimento da pá à jusante do rotor



k) 5 pás - duas vezes o comprimento da pá à jusante do rotor



l) 5 pás - cinco vezes o comprimento da pá à jusante do rotor

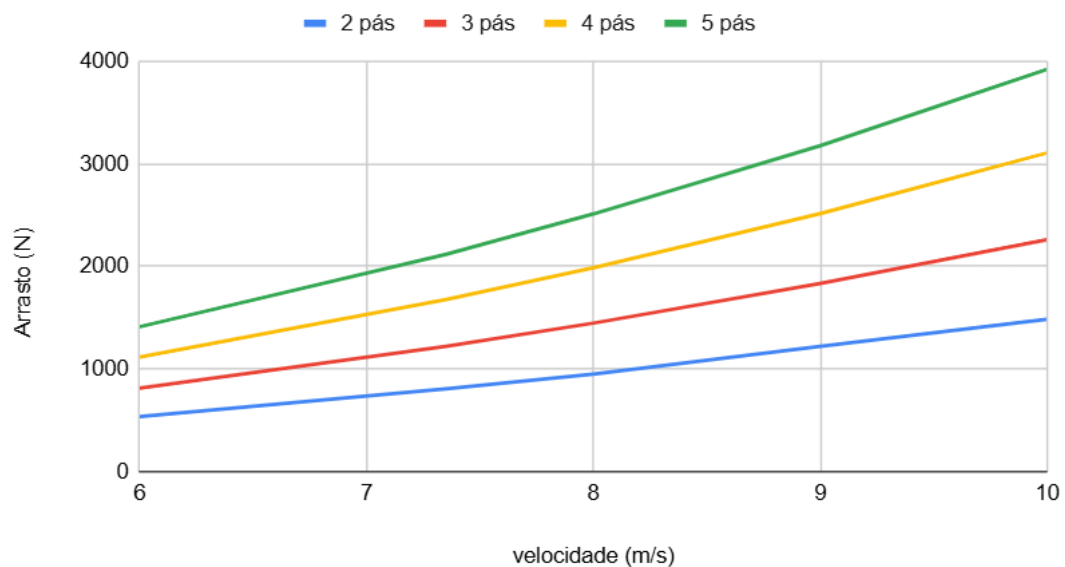


Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 Avaliação Estática de Torque e Arrasto

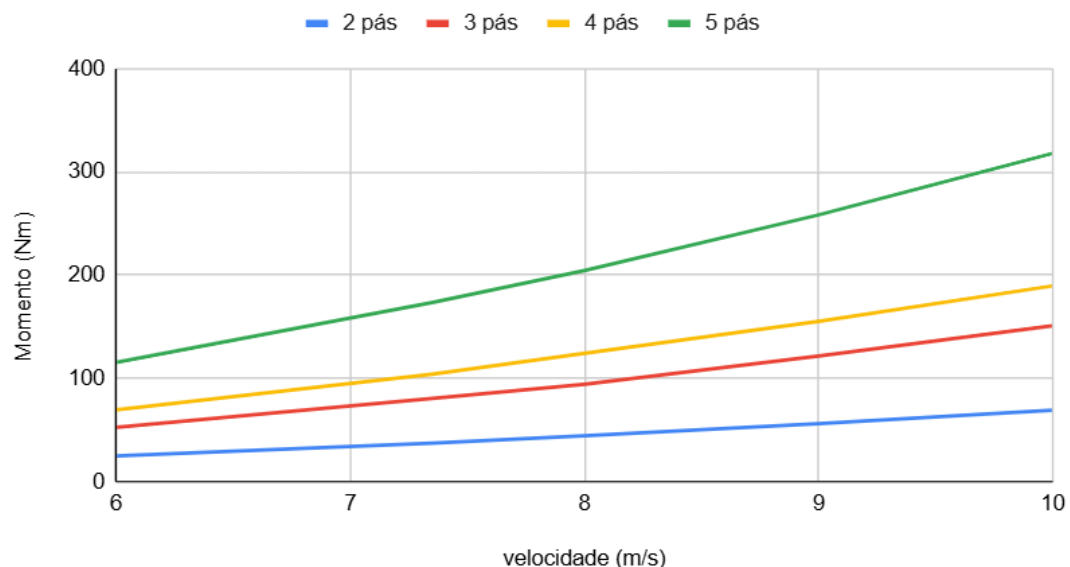
A análise das forças de arrasto e torque (momento estático) é fundamental, pois tais grandezas atuam como indicadores diretos da interação fluido-estrutura. O arrasto representa a resistência total imposta pelo rotor ao escoamento, enquanto o torque estático reflete a tendência de rotação do rotor. Nos resultados obtidos, os gráficos das figuras 16 e 15 evidenciam a evolução dessas grandezas em função do aumento da velocidade, permitindo avaliar de forma comparativa o impacto da variação do número de pás sobre o comportamento aerodinâmico da turbina.

Figura 15– Gráfico da relação arrasto *versus* velocidade



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16– Gráfico da relação Momento *versus* velocidade



Fonte: Autoria própria (2025)

Um aumento no número de pás eleva a área frontal de bloqueio, resultando tipicamente em um maior arrasto. Fisicamente, um arrasto elevado indica que o fluido está sendo forçado a contornar a turbina ou desacelerar bruscamente, criando uma zona de esteira (wake) com baixa velocidade e alta turbulência.

Este comportamento pode ser explicado fundamentalmente pela solidez do rotor, pois o aumento na área sólida impõe uma barreira física maior ao escoamento do vento, ou seja, quanto maior o número de pás, maior é a obstrução frontal que o fluido encontra. Portanto, conclui-se que rotores com alta solidez geram maiores cargas de empuxo na torre, exigindo maior robustez estrutural.

Com relação ao torque, é possível perceber a partir do gráfico que o torque aumenta a medida que o número de pás aumenta. Este resultado indica que turbinas com maior solidez possuem maior facilidade de partida em ventos fracos. É possível notar ainda a partir da figura 16 que a medida que a velocidade aumenta o torque também aumenta e que o coeficiente angular é mais elevado para rotores com maior número de pás. Isso significa que a taxa de incremento do torque em função da velocidade é significativamente maior para as configurações de alta solidez (4 e 5 pás) em comparação às de baixa solidez (2 pás). O mesmo comportamento de inclinação da reta se repete para o arrasto, como pode ser observado na figura 15. O crescimento acentuado do momento e do arrasto representa um risco à integridade do equipamento, pois cargas excessivas demandam uma maior robustez estrutural para evitar falhas por fadiga ou ruptura. Consequentemente, a vantagem do torque de partida em rotores com muitas pás pode ser anulada pela necessidade de maior robustez estrutural e complexidade nos sistemas de frenagem, elevando o custo e o peso da turbina.

5 CONCLUSÕES GERAIS

O estudo desenvolvido permitiu compreender como o número de pás influencia o comportamento aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo horizontal. A partir da modelagem tridimensional das geometrias, das simulações computacionais e da análise comparativa entre as configurações avaliadas foi possível observar padrões consistentes no escoamento, no arrasto, no torque e nos níveis de turbulência gerados a jusante do rotor.

Os resultados mostraram que o aumento do número de pás eleva a solidez do rotor, ampliando a área de bloqueio ao escoamento e intensificando tanto o arrasto quanto a turbulência na esteira. Esse efeito se expressa na formação de regiões mais extensas de baixa velocidade atrás da turbina. Por outro lado, verificou-se que rotores mais sólidos tendem a apresentar maior torque inicial, o que facilita a partida em condições de vento reduzido, mas que pode ser perigoso quando a velocidade é aumentada, demandando maior robustez estrutural da turbina para aguentar altas cargas. Os resultados encontrados estão alinhados ao comportamento esperado da literatura o que valida a metodologia empregada.

A análise dos resultados também evidencia que embora turbinas com mais pás exibam maior torque estático, elas não necessariamente apresentam vantagens práticas suficientes para justificar seu uso frente às perdas adicionais por arrasto. Tal constatação reforça por que a maior parte das turbinas comerciais de eixo horizontal adota duas ou três pás, buscando equilíbrio entre eficiência, robustez, custo e desempenho operacional.

De modo geral, o estudo atingiu seu propósito ao demonstrar, por meio de simulações numéricas, como diferentes geometrias impactam o comportamento aerodinâmico e o desempenho estático de turbinas eólicas. A investigação oferece subsídios técnicos úteis para projetos conceituais de rotores, destacando a importância da solidez, da relação de torque e arrasto e da influência do escoamento turbulento para decisões de engenharia em sistemas de geração eólica.

Espera-se que este trabalho apresente contribuições relevantes para o entendimento de turbinas eólicas, contribuindo para avaliação de como o número de pás influencia variáveis importantes da aerodinâmica. O estudo apresenta uma explicação sobre a relação entre solidez, torque e arrasto. Essa abordagem contribui para tornar mais visível a importância de parâmetros que influenciam não apenas a eficiência, mas também a estabilidade operacional e os custos de fabricação e manutenção.

5.1 Limitações e futuros trabalhos

Entre as limitações, destaca-se o fato de as análises serem realizadas com o rotor parado, o que não contempla efeitos dinâmicos de rotação. Além disso, o modelo utilizado representa apenas condições ideais, sem considerar variação de velocidade incidente na turbina, flexibilização das pás ou efeitos térmicos.

Como continuidade natural deste estudo, sugere-se a realização de simulações transientes com rotor em movimento, estudos tridimensionais de escoamento com dinâmica de pás, análises

de fadiga associadas à turbulência e investigação experimental em túnel de vento. Além disso pode se estudar o impacto da esteira nas turbinas a jusante. A combinação dessas abordagens permitiria uma caracterização ainda mais precisa do impacto do número de pás sobre o desempenho global de turbinas eólicas.

REFERÊNCIAS

AL-SHEMMERI, T. *Wind Turbines*. Denmark: Ventus Publishing ApS, 2010. ISBN 978-87-7681-692-6.

ALI, M. S. M.; DOOLAN, C. J.; WHEATLEY, V. Grid convergence study for a two-dimensional simulation of flow around a square cylinder at a low reynolds number. In: CSIRO. *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. [S.l.], 2009.

ANSYS. *ANSYS Student*. 2025. <<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>>. Acesso em: 26 nov. 2025.

ANSYS Inc. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide – Seção 4.5.1: Standard k-omega Model*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node66.htm>>. Acesso em: 18 out. 2025.

Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. *Boletim Anual 2024*. 2024. <<https://abeeolica.org.br>>. Acesso em: 06 nov. 2025.

BAKKER, A. *Lecture 6 – Boundary Conditions Applied Computational Fluid Dynamics*. 2002. <<http://www.bakker.org>>. Material de aula. Fluent Inc. (2002). Acesso em: 26 nov. 2025.

BARBOSA, E. T. I. et al. Uma revisão preliminar dos efeitos turbulentos de vento nos desvios de geração em turbinas eólicas. *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Eólica*, 2025. Disponível na página de título do artigo.

BLOCKEN, B. Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, Elsevier, v. 91, p. 219–245, 2015.

BONTEMPO, R.; MANNA, M. A numerical proof of the betz–joukowski limit. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 241, p. 122299, 2025.

CHOWDHURY, I. A. State-of-the-art cfd simulation: A review of techniques, validation methods, and application scenarios. *Journal of Recent Trends in Mechanics*, v. 9, n. 2, p. 45–53, 2024. Published July–December 2024.

DIXON, S. L.; HALL, C. A. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. 7. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-415954-9.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Velocidade média horária do vento por mês*. 2025. <<https://amadvp.epe.gov.br/>>. Imagem da plataforma AMADA. Acesso em: 06 nov. 2025.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: características gerais dos domicílios e dos moradores 2024*. 2025.

INESTROZA, M. A. Z. *Influência da Turbulência Atmosférica na Esteira Aerodinâmica de Turbinas Eólicas: Estudo Experimental em Túnel de Vento*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

JR., J. D. A. *Fundamentals of Aerodynamics*. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 978-0-07-339810-5.

LÓPEZ, M. B.; LEAL, D. F. B.; LEMOS, S. Y. G. *Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa*. 2015. Grupo de Investigación AVARC, Universidad de la Salle Bogotá, Programa de Ingeniería en Automatización. Publicado por DIFTUdyuC©. Disponível em: <http://nautilus.waz.edu.ms/diftu01ctia>.

MANWELL, J.; MCGOWAN, J.; ROGERS, A. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2. ed. Chichester, UK: Wiley, 2009.

MESHRAM, H. B. Study of classification of wind turbines and its applications. *Indian Journal of Modern Research and Reviews*, Committee on Publication Ethics Member, Chandrapur, Maharashtra, India, v. 3, n. 3, mar. 2025. ISSN 2584-184X. Review Paper.

NETO, O. D. *Avaliação do desempenho aerodinâmico de turbina eólica de eixo horizontal através de modelagem e simulação computacionais*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2017.

NILUGAL, M. L.; KARANTH, K. V.; MADHWESH, N. A critical review on the application of computational fluid dynamics in centrifugal turbomachines. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1473, p. 012012, 2020. International Conference on Thermo-fluids and Energy Systems (ICTES2019).

QUEIROZ, E. H. M. d. *Turbinas Eólicas: evolução da análise aerodinâmica e desafios encontrados*. 2021. Monografia de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia. Orientadora: Profa. Dra. Yanne Novais Kyriakidis. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/33494/1/TurbinasE%C3%B3licasEvolu%C3%A7%C3%A3o.pdf>.

ROACHE, P. J. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, ASME, v. 116, p. 405–413, 1994. Ecodynamics Research Associates, Inc., Albuquerque, N.M. 87119.

ROCHA, A. V. d. et al. *Fundamentos de Energia Eólica*. Natal-RN: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2023. Apoio institucional: Energife, Editorial IFRN, Ministério da Educação, Governo Federal Brasil, Didáticos.

SILVA, A. Briggs da. Projeto aerodinâmico de turbinas eólicas. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

SOUZA, S. F. de. *Análise e Simulação de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (Darrieus e Lenz2) e Horizontal para o Dimensionamento de Geradores Elétricos*. Trabalho de Conclusão de Curso, Campo Grande, MS, 2018.

VERGEL, J. L. G. *Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT usando Malhas Não-estruturadas*.

2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd. ed. Harlow, England: Pearson Education, 2007.

WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro, Brasil: McGraw-Hill, 2010. 880 p.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. 3. ed. La Cañada, California: DCW Industries, 2006. ISBN 978-1928729082.

WITTWER, A. R. et al. Escoamento na esteira de turbinas eólicas: análise espectral da turbulência mediante testes em túnel de vento. *Ciência e Natura*, v. 38, n. esp., p. 1–6, 2016. IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/19850>.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações*. 6. ed. São Paulo: AMGH, 2007.