



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ MACHADO DE QUEIROZ FILHO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE QBLADE: ESTUDO DA
TEORIA DO MOMENTO DO ELEMENTO DE PÁ**

RUSSAS

2025

ANDRÉ MACHADO DE QUEIROZ FILHO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE QBLADE: ESTUDO DA TEORIA
DO MOMENTO DO ELEMENTO DE PÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Campus Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Augusto
Santos Costa.

RUSSAS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F498s Filho, André Machado de Queiroz.
Simulação computacional com o software QBlade: estudo da teoria do momento do elemento de pá /
André Machado de Queiroz Filho. – 2025.
65 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa.

1. Teoria do momento do elemento de pá. 2. Turbinas eólicas. 3. QBlade. I. Título.

CDD 620.1

ANDRÉ MACHADO DE QUEIROZ FILHO

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE QBLADE: ESTUDO DA TEORIA
DO MOMENTO DO ELEMENTO DE PÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Campus Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Neves da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sílvia Teles Viana
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus. À minha família, por acreditar e investir em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

À minha família, por me apoiarem e por proporcionarem o melhor para mim.

Ao Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa, pela excelente orientação.

Aos meus amigos da faculdade.

Aos professores participantes da banca examinadora Antônio Neves da Silva e Sílvia Teles Viana pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

"A energia renovável é a chave para um futuro sustentável." (Hermann Scheer)

RESUMO

A energia renovável tem ganhado destaque no cenário global, especialmente em meio a preocupações com as mudanças climáticas e recordes históricos de temperatura. Nesse contexto, as turbinas eólicas destacam-se como uma tecnologia essencial para reduzir a emissão de gases que intensificam o efeito estufa, além de representarem uma fonte limpa e sustentável de geração energética. O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia do método numérico baseado na Teoria do Momento do Elemento de Pá (BEMT) na previsão da potência extraída por turbinas eólicas, comparando resultados de dois experimentos distintos. Para tal, utilizou-se o software QBlade, que integra um algoritmo numérico padronizado, permitindo simulações precisas e reproduzíveis. A metodologia incluiu a validação do programa por meio de dados experimentais, assegurando a confiabilidade dos resultados. Nisso, os testes abrangeram diferentes condições operacionais, com ênfase na variação de velocidade do vento. Ademais, os resultados demonstraram que o método apresentou excelente precisão em velocidades baixas e moderadas, alinhando-se consistentemente com os dados empíricos, mas em velocidades mais altas foram observadas discrepâncias significativas. Apesar disso, o estudo comprovou que a abordagem numérica empregada é eficiente para simulações rápidas, oferecendo um equilíbrio entre acurácia e tempo computacional. Conclui-se que a metodologia analisada constitui uma ferramenta valiosa para projetos preliminares de turbinas eólicas, principalmente em estágios iniciais de desenvolvimento. Dessa forma, o trabalho contribui para o avanço de técnicas sustentáveis, reforçando o papel estratégico da energia eólica na transição energética global.

Palavras-chave: Teoria do Momento do Elemento de Pá; Turbina eólica; QBlade

ABSTRACT

Renewable energy has gained prominence in the global scenario, particularly amid concerns about climate change and historical temperature records. In this context, wind turbines stand out as essential technology for reducing emissions of greenhouse gases, while also representing a clean and sustainable energy source. This study aimed to evaluate the effectiveness of the numerical method based on the Blade Element Momentum Theory (BEMT) in predicting the power extracted by wind turbines, comparing results from two distinct experiments. For this purpose, the QBlade software was employed, which integrates a standardized numerical algorithm, enabling precise and reproducible simulations. The methodology included program validation through experimental data to ensure result reliability. Tests covered diverse operational conditions, with emphasis on wind speed variation. The results demonstrated that the method exhibited excellent accuracy at low and moderate wind speeds, consistently aligning with empirical data. However, at higher speeds, significant discrepancies were observed, indicating limitations in the model's predictive capability under such conditions. Despite this, the study confirmed that the numerical approach is efficient for rapid simulations, offering a balance between accuracy and computational time. It is concluded that the analyzed methodology constitutes a valuable tool for preliminary design and optimization of wind turbines, particularly in early development stages. However, supplementation with more complex models is recommended for scenarios requiring evaluation under high-intensity winds. Thus, this work contributes to advancing sustainable techniques, reinforcing the strategic role of wind energy in the global energy transition.

Keywords: Blade Element Momentum Theory; QBlade; Wind turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Turbinas de eixo horizontal.	18
Figura 2 – Configuração do rotor da HAWT.	19
Figura 3 – Turbinas de eixo vertical.	19
Figura 4 – Nomenclaturas do aerofólio.	20
Figura 5 – Ângulo de ataque.	21
Figura 6 – Efeito estol.	22
Figura 7 – Atraso de estol.	22
Figura 8 – Disco atuador e cone de expansão.	26
Figura 9 – Demonstração de um elemento de pá.	29
Figura 10 – Velocidades em um elemento da pá.	29
Figura 11 – Forças envolvidas em um elemento da pá.	30
Figura 12 – Configurações Viterna - NREL Phase VI.	41
Figura 13 – Configurações <i>Circular Foil</i> -NREL Phase VI.	41
Figura 14 – Geometria da pá NREL Phase VI no QBlade.	42
Figura 15 – Geometria da pá NREL Phase VI no QBlade.	42
Figura 16 – Configurações do <i>Turbine BEM</i> no QBlade.	43
Figura 17 – Configurações da simulação do NREL Phasse VI no QBlade.	43
Figura 18 – Configurações do XFOIL do QBlade.	44
Figura 19 – Configurações da extrapolação Viterna.	45
Figura 20 – Configurações do <i>Rotor BEM</i> e simulação.	45
Figura 21 – Geometria da pá pequena.	46
Figura 22 – Potência em relação ao vento do QBlade e experimento NREL Phase VI.	47
Figura 23 – Coeficiente de força normal no raio de 1,510 m.	48
Figura 24 – Coeficiente de força normal no raio de 3,172 m.	49
Figura 25 – Coeficiente de força normal no raio de 4,780 m.	50
Figura 26 – Coeficiente de força tangencial no raio de 1,510 m.	50
Figura 27 – Coeficiente de força tangencial no raio de 3,172 m.	51
Figura 28 – Coeficiente de força tangencial no raio de 4,780 m.	51
Figura 29 – Coeficiente de potência entre o QBlade e experimento da pequena pá.	53
Figura 30 – Coeficiente de empuxo entre o QBlade e experimento da pequena pá.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados geométricos da pá - NREL Phase VI	39
Tabela 2 – Dados geométricos da pá de pequeno porte	40
Tabela 3 – Estudos relacionados a precisão do XFOIL.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEMT	Teoria do Momento do Elemento de Pá
CFD	Fluidodinâmica Computacional
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Fator de indução axial
a'	Fator de indução tangencial
A	Área do cone de expansão
A_d	Área do disco da turbina
AR	Relação de aspecto entre raios e a corda da pá
B	Número de pás
c	Corda do elemento de pá
C_D	Coefficiente de arrasto do aerofólio
$C_{D_{estol}}$	Ângulo de arrasto no estol
$C_{D_{max}}$	Coefficiente de arrasto máximo
C_L	Coefficiente de sustentação do aerofólio
$C_{L_{estol}}$	Coefficiente de sustentação no estol
$C_{L,2D}$	Coefficiente de sustentação sem o efeito rotacional
$C_{L,3D}$	Coefficiente de sustentação corrigido
C_n	Coefficiente de força normal
C_t	Coefficiente de força tangencial
C_P	Coefficiente de potência
C_T	Coefficiente de empuxo
$C_{P,max}$	Coefficiente de potência máximo
F	Fator de correção de perda
F_D	Força de arrasto
F_N	Força normal
F_T	Força tangencial
F_L	Força de sustentação
P	Potência eólica
P_d^+	Pressão máxima no plano do rotor da turbina

P_∞	Pressão da zona não afetada pela turbina
P_d^-	Pressão mínima no plano do rotor do aerogerador
Q	Torque
r	Posição em relação ao centro do rotor
r_h	Raio do cubo da turbina
R	Raio do rotor
T	Força de empuxo
U_∞	Velocidade do vento
U_{rel}	Velocidade do vento relativa
U_1	Velocidade do vento a montante da turbina
U_2	Velocidade do vento a no plano do rotor da turbina
U_3	Velocidade do vento a jusante do aerogerador
V	Velocidade do fluido
α	Ângulo de ataque
α_{estol}	Ângulo de ataque de estol
β	Ângulo de torção
σ	Solidez
σ'	Solidez local
λ	Razão de velocidade da ponta
ρ	Densidade do fluido
ν	Viscosidade cinemática do fluido
ϕ	Ângulo de incidência
ω	Velocidade angular
Ω	Rotação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	17
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	17
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Perfis aerodinâmicos	20
2.2	Estol e <i>stall delay</i>	21
2.3	BEMT	23
3	MODELOS MATEMÁTICOS	26
3.1	Noções básicas da teoria do momento axial unidimensional e limite de Betz	26
3.2	Teoria do elemento de pá	28
3.3	Teoria do momento do elemento de pá	31
3.4	Correção de perda de ponta	32
3.5	Correção de Glauert	33
3.6	Correção para alto ângulos de ataque	33
3.7	Correção 3D	35
3.8	Simulação BEM das geometrias	35
4	METODOLOGIA	38
4.1	Experimento NREL Phase VI	38
4.2	Experimento da turbina de pequeno porte	38
4.3	QBlade	39
4.4	Metodologia de implementação do QBlade no experimento NREL Phase VI	40
4.5	Metodologia de implementação do QBlade no experimento da turbina pequena	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Avaliação da potência através do NREL Phase VI	47
5.2	Avaliação do coeficiente da força normal e força tangencial do NREL Phase VI	48
5.3	Avaliação do experimento da turbina pequena no QBlade	52
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	54

6.1	Conclusão	54
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	54
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A –DADOS EXPERIMENTAIS DO AEROFÓLIO S809 -	
	 PARTE A	60
	APÊNDICE B –DADOS EXPERIMENTAIS DO AEROFÓLIO S809 -	
	 PARTE B	61
	APÊNDICE C –COORDENADAS DO AEROFÓLIO S809 - PARTE A	62
	APÊNDICE D –COORDENADAS DO AEROFÓLIO S809 - PARTE B .	63

1 INTRODUÇÃO

O termo 'renovável' refere-se à capacidade de um recurso de ser regenerado, repostado ou recuperado. A energia renovável é aquela que não se esgota mesmo com a utilização contínua. Essas fontes têm a capacidade de se renovar em um curto espaço de tempo (DESHMUKH *et al.*, 2023).

No Brasil, o crescimento da energia eólica é notável. Segundo a ABEEÓLICA (2024), no seu boletim anual mais recente, o ano de 2023 apresentou um crescimento de 18,79% em relação à potência de dezembro de 2022, de 30,45 GW com 1.027 parques eólicos. Além disso, é necessário um aumento de quatro vezes na velocidade de instalação de aerogeradores para conter o efeito do aquecimento global. As questões ambientais, a contaminação do ar e as mudanças climáticas significativas estão sendo combatidas por meio do uso de fontes renováveis de energia, com a energia eólica assumindo uma função fundamental (BOŠNJAKOVIĆ *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, os investidores demandam estratégias capazes de prever com acurácia o potencial energético e a sustentabilidade econômica de projetos de energia maremotriz. Nesse contexto, as ferramentas baseadas em Fluidodinâmica Computacional (CFD) destacam-se como uma das principais opções para analisar áreas costeiras e otimizar o posicionamento de turbinas submersas (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Entretanto, na prática, essas simulações necessitam de maior capacidade de processamento, elevando custos operacionais, além de precisarem de uma infraestrutura robusta, tempo de convergência alto, intervalo prolongado e conhecimento avançado para configurar modelos realistas (WITHERDEN; JAMESON, 2017).

Dessa forma, métodos semi-analíticos, tais como a teoria do momento do elemento de pá, tornam-se relevantes por proporcionar um equilíbrio entre a precisão e rapidez. Isso é possível pela simplificação do problema físico dos escoamentos, reduzindo a complexidade matemática e a necessidade de elaborar geometria com nível avançado de detalhes. Além disso, por razão de se assumirem hipóteses simplificadoras, a velocidade de avaliação do desempenho de turbinas é realizada em tempos menores. Assim, esse método surge de modo a complementar/substituir o CFD, sobretudo em fases iniciais de desenvolvimento, às quais a agilidade e custo-benefício são notáveis para a tomada de decisão (MANWELL *et al.*, 2024).

Essa teoria tem suas raízes atribuídas a Willian Rankine e Robert Froude, os quais em seus estudos sobre hélices de navios, criaram para calcular a performance de hélices de navios, a

teoria unidimensional do momento, a qual predizia a produção de potência e a força de empuxo do vento (MANWELL *et al.*, 2024). Porém, em 1930, Glauert observou que os estudiosos não consideravam o número de pás, o ângulo de torção, a corda e os aerofólios. Dessa forma, foi desenvolvida a teoria do elemento da pá, a qual decompõe essa em elementos infinitesimais, calculando para cada seção as forças envolvidas (HANSEN, 2008).

Mesmo a partir dessa evolução, a solução clássica envolve um processo iterativo entre as equações do momento e dos elementos da pá. Dessa maneira, há condições mais complexas que desencadeiam a instabilidade do algoritmo de solução, causando a não convergência de fatores essenciais como o de indução axial e tangencial, ocasionando a limitação na precisão nos regimes extremos ou com geometrias altamente otimizadas.

Com base nessa metodologia, uma série de softwares especializados foram desenvolvidos e consolidados no mercado, destacando-se soluções como OpenFAST, ferramenta de código aberto do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para simulação de turbinas eólicas, Bladed (software da DNV para análise de cargas e dinâmica de aerogeradores), windPro (plataforma para otimização de parques eólicos onshore/offshore), QBlade (ambiente gratuito para projeto de turbinas eólicas e hidrocínéticas) e RETScreen (suíte para análise de viabilidade de energias renováveis).

A seleção dessas ferramentas considerou não apenas sua projeção de relevância técnica até 2025, alinhada a tendências como a expansão de energias renováveis e exigências de certificação, mas também seu histórico comprovado por meio de validações rigorosas contra bancos de dados experimentais (como ensaios em túnel de vento e medições de campo) e aplicação prática em projetos comerciais de grande escala (parques eólicos offshore, por exemplo) e pesquisas acadêmicas (publicações indexadas em temas como fluidodinâmica computacional).

Devido à sua interface mais amigável, baixa curva de aprendizado e o BEMT implementado, foi escolhido o QBlade como a ferramenta neste estudo. Esse, então, apresentado no trabalho pioneiro de Marten *et al.* (2013), mostrou características, funcionalidades e a documentação detalhando o seu mecanismo, o que possibilitou usá-lo junto ao seu código livre em trabalhos acadêmicos. As principais características dele são:

- Importação fácil de coordenadas para a criação de aerofólios;
- XFOIL implementado como padrão, não havendo necessidade de baixar-lo para criar polares;
- Ambiente simples para implementar correções necessárias do BEMT;

- Criação de geometria bastante acessível e descomplicado;
- Simulação rápida de turbinas.

Diante disso, o objetivo do trabalho foi investigar o potencial do software em prever a potência. Para isso, dois experimentos distintos, com configurações diferentes, foram usados.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a teoria do BEMT estabelecido do software QBlade em dois experimentos com configurações diferentes, um variando de baixas a altas velocidades e o outro com a velocidade constante, de forma a validar o método numérico em prever a potência extraída em distintos ambientes.

1.1.2 Objetivos específicos

O estudo ainda tem alguns objetivos secundários, tais como:

- Modelar pás de turbina através do QBlade.
- Testar capacidade do XFOIL.
- Analisar o efeito do atraso de estol.
- Analisar os coeficiente de força normal e de força tangencial do NREL Phase VI em relação ao QBlade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Turbinas Eólicas são dispositivos que convertem a energia cinética do vento em energia mecânica ou elétrica, utilizando pás rotativas acopladas a um gerador. Compostas por três componentes principais: rotor (pás e cubo), nacelle (que abriga o gerador e sistemas de controle) e torre, são instaladas em locais com ventos constantes e velocidades adequadas. Podem ser classificadas como eixo horizontal (mais comuns, com pás girando perpendicularmente ao vento) ou eixo vertical (menos frequentes, com rotação paralela ao solo), apresentadas na Figura 1 e Figura 3. Utilizadas em parques eólicos para geração em larga escala ou em sistemas menores para uso residencial/regional, destacam-se como fonte renovável, reduzindo emissões de carbono e dependência de combustíveis fósseis (PINTO, 2013).

As turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT) são representadas na Figura 1, constituindo o modelo mais difundido na geração de energia eólica, identificado por um formato que remete aos cata-ventos tradicionais. Além disso, nessa configuração, o rotor dispõe-se perpendicularmente à direção do vento, otimizando a conversão da energia cinética em mecânica (LETCHER, 2023).

Figura 1 – Turbinas de eixo horizontal.

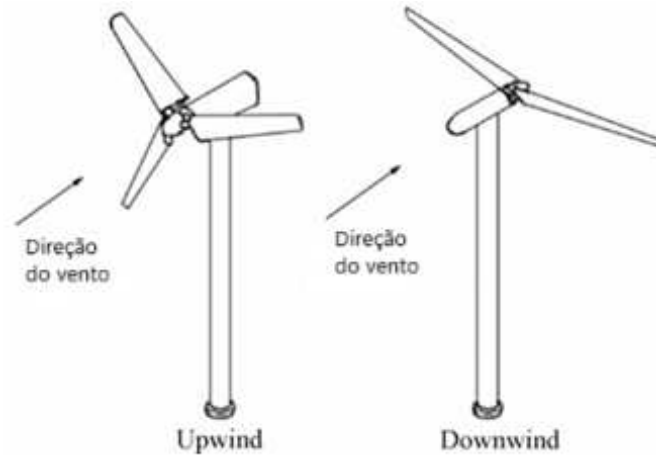


Fonte: Fthenakis *et al.* (2024).

Além disso, essas estruturas apresentam diferentes configurações técnicas para o posicionamento das pás em relação à direção do vento, estratégias conhecidas como downwind (a favor do vento) e upwind (contra o vento). Cada abordagem possui particularidades operacionais e influencia diretamente aspectos como a eficiência energética, a estabilidade estrutural e a resposta a variações de fluxo aerodinâmico. Enquanto o posicionamento upwind busca otimizar o aproveitamento da força do vento antes que este interaja com a torre, o downwind permite

uma adaptação dinâmica às turbulências, reduzindo cargas mecânicas em condições adversas (ALMEIDA, 2013). Essas variações são ilustradas de forma esquemática na Figura 2.

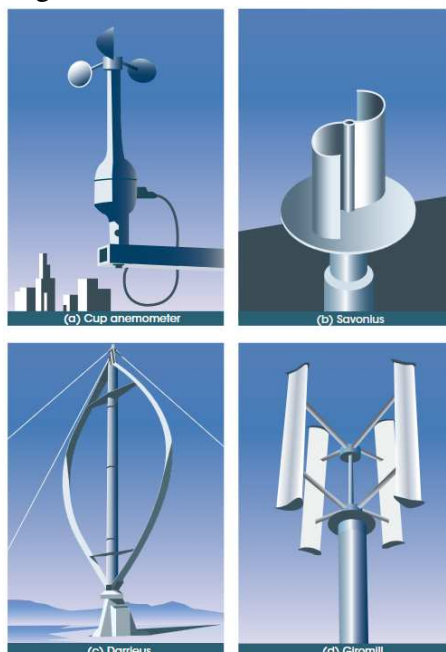
Figura 2 – Configuração do rotor da HAWT.



Fonte: Adaptado de Manwell *et al.* (2009).

Já as turbinas de eixo vertical (VAWT) são alternativas tecnológicas, destacando-se por sua configuração rotacional, em que é possível, em tamanho reduzido, gerar uma energia significativa. Nessas, os rotores operam de forma paralela ao solo, de forma a eliminar a necessidade de ajuste na orientação em função da direção do vento, um diferencial que as torna adaptáveis a ambientes com padrões complexos no vento. E, conforme exemplificado na Figura 3, há diferentes configurações compactas dessas turbinas Fthenakis *et al.* (2024).

Figura 3 – Turbinas de eixo vertical.

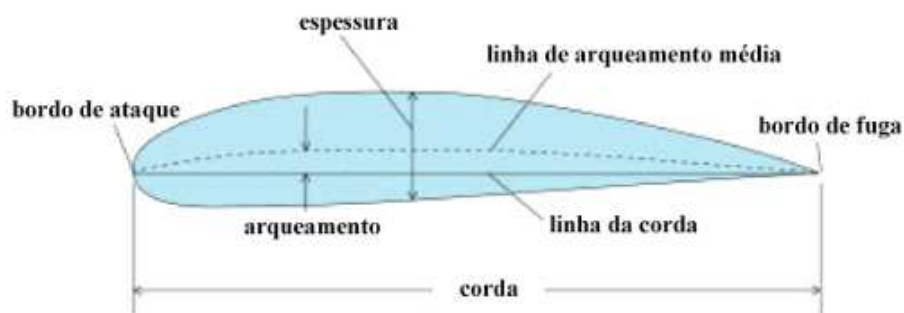


Fonte: Fthenakis *et al.* (2024).

2.1 Perfis aerodinâmicos

Consoante ao Rodrigues (2013), um perfil aerodinâmico consiste em uma superfície especialmente projetada para gerar forças aerodinâmicas por meio da interação com o movimento de um fluido em seu entorno. Essa estrutura é desenvolvida com o objetivo de aproveitar o fluxo do fluido ao redor, produzindo efeitos dinâmicos específicos. Além do mais, continuando com o raciocínio do autor, um aerofólio possui as seguintes características: corda (c), bordo de ataque, espessura, linha de arqueamento médio, bordo de fuga, arqueamento e linha da corda, mostrados na Figura 4.

Figura 4 – Nomenclaturas do aerofólio.



Fonte: Rodrigues (2013).

Ainda têm-se duas forças importantes na operação dos aerofólios: Força de sustentação e de arrasto. Em conformidade com Fox *et al.* (2000), para aerofólios, a sustentação é a força mais significativa, essa age de forma perpendicular à velocidade do vento, e é expressa como Rodrigues (2013):

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 c \quad (2.1)$$

Em que, C_L é o coeficiente de sustentação, V é a velocidade do fluido e A_p é a área da seção transversal. Já a força de arrasto, é paralela ao sentido do fluido e descrita como:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 c \quad (2.2)$$

Onde esse possui o coeficiente de arrasto C_D .

Além disso, será definida a curva polar, ou apenas polar, e o número de Reynolds em concordância com Hau (2013). A polar possui duas maneiras de ser definida: a primeira são gráficos de C_L ou C_D em função do ângulo de ataque e a segunda, curvas, também em forma de

gráfico, mas com a diferença de que os coeficientes são relacionados entre si, tais como C_L por C_D , em que o ângulo de ataque é apenas um parâmetro. Já o número de Reynolds é definido a partir da Equação 2.3.

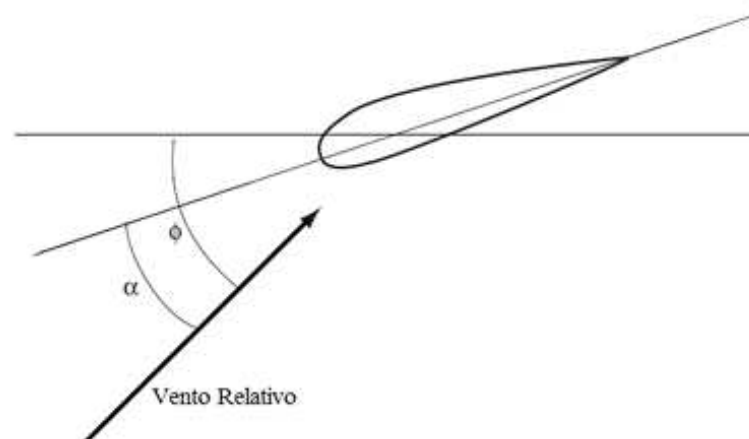
$$Re = \frac{V \cdot c}{\nu} \quad (2.3)$$

onde:

ν – Viscosidade cinemática do fluido $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Em conclusão, outra definição importante para o estudo de aerofólios é o ângulo de ataque (α), formado entre a linha da corda e a direção do vento relativo (SILVEIRA, 2023). Esse é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Ângulo de ataque.

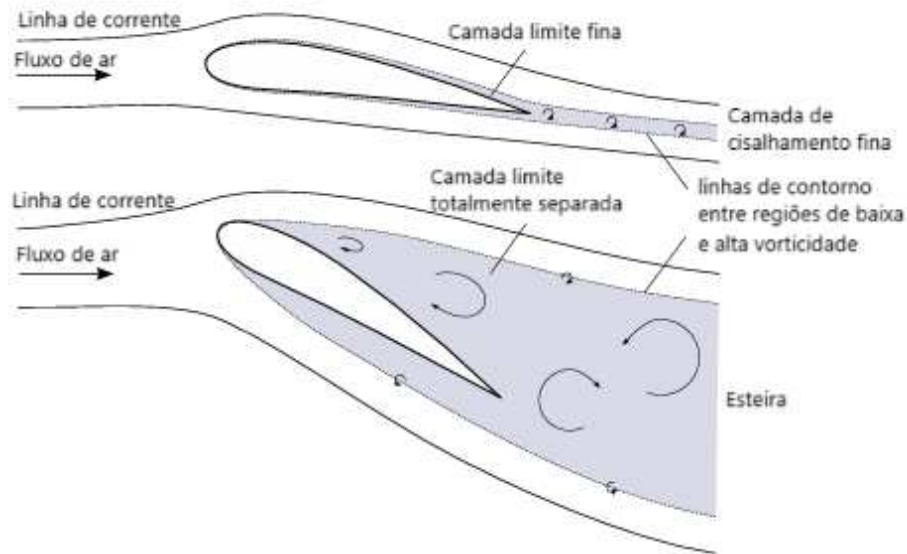


Fonte: Almeida (2013).

2.2 Estol e *stall delay*

O autor Fouest *et al.* (2021) define o estol como uma condição comumente encontrada e geralmente indesejada que ocorre quando o ângulo de ataque de um aerofólio excede um ângulo crítico. Ainda é argumentado que o estol estático não é fenomenologicamente diferente do estol dinâmico e que ambos se tratam da separação do fluxo e perda de sustentação. Entender esses efeitos é importante em função de que pode reduzir a eficiência da turbina eólica ao diminuir a sustentação, aumentar o arrasto e causar flutuações nas cargas aerodinâmicas (KARBASIAN *et al.*, 2022). Esse efeito é observado na Figura 6.

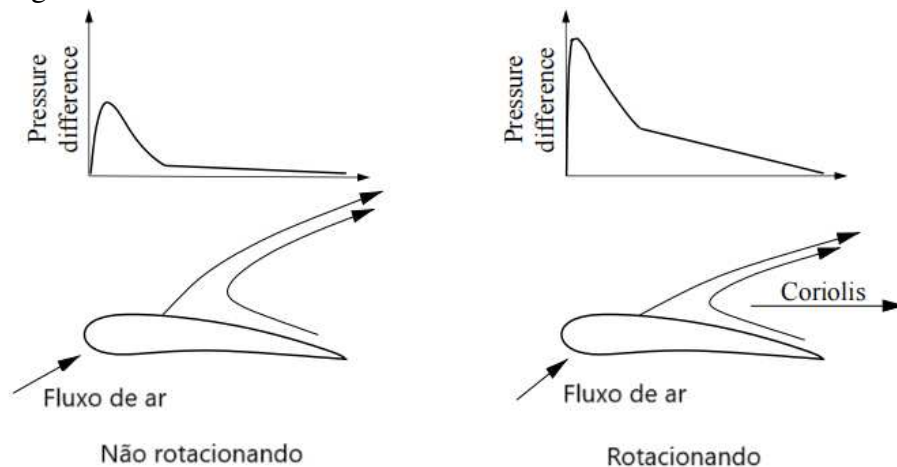
Figura 6 – Efeito estol.



Fonte: Adaptado de Manwell *et al.* (2024).

Contudo, conforme destacado por Yu *et al.* (2011), aerofólios em movimento rotacional apresentam um aumento significativo no ângulo de ataque crítico para a ocorrência do estol quando comparados a ensaios estáticos bidimensionais. Esse fenômeno torna-se particularmente relevante na região mais próxima à raiz, onde se observam coeficientes de sustentação que ultrapassam consideravelmente os valores máximos obtidos em condições estáticas 2D. E na Figura 7, é demonstrado um dos principais autores desse efeito: a Força de Coriolis, a qual aumenta a diferença de pressão quando a pá está girando, ocasionando um aumento do coeficiente de sustentação (KABIR *et al.*, 2022).

Figura 7 – Atraso de estol.



Fonte: Adaptado de Kabir *et al.* (2022).

2.3 BEMT

O método BEMT combina a teoria do momento unidimensional com a teoria do elemento de pá para analisar o desempenho de hélices e turbinas. A teoria do momento unidimensional modela o rotor como um "disco atuador" que acelera o fluido axialmente, gerando empuxo via conservação de momento. Considera-se um fluxo incompressível e estacionário, aplicando as equações de Bernoulli antes e após o disco para relacionar pressão e velocidade. A velocidade induzida no disco é determinada pelo equilíbrio entre empuxo e variação de momento do fluido. Essa abordagem simplifica efeitos complexos, como vórtices, assumindo fluxo uniforme. Limita-se por ignorar detalhes da geometria das pás, focando em grandezas globais como potência e eficiência (MANWELL *et al.*, 2024).

A teoria do elemento de pá decompõe a pá em seções infinitesimais, tratadas como perfis aerodinâmicos 2D. Cada elemento gera forças de sustentação e arrasto, dependentes do ângulo de ataque local e da velocidade relativa do vento. Integrando essas forças ao longo da pá, obtêm-se o empuxo total e o torque do rotor. A velocidade induzida calculada na teoria do momento é usada para ajustar o ângulo de ataque efetivo em cada seção. Entretanto, a teoria desconsidera interações 3D, como efeitos de ponta de pá e interferência entre elementos. No BEMT, as duas teorias são acopladas iterativamente, corrigindo a velocidade induzida e as cargas aerodinâmicas para maior precisão (MANWELL *et al.*, 2024).

Para aprofundamento, consulte os desenvolvimentos teóricos no Capítulo 3.

A partir daqui, é interessante citar diferentes estudos base do trabalho. Primeiramente, Tangler (2002) foi o pioneiro em tratar das dificuldades observadas na simulação de turbinas eólicas com o método BEMT. O primeiro foi em relação ao efeito causado por diferentes coeficientes de sustentação e arrasto do aerofólio S809 encontrados na literatura, sendo observada a diferença dos valores calculados, principalmente, na região de estol. Além disso, os efeitos de ponta e dos vórtices gerados próximos ao cubo da turbina não foram reproduzidos com sucesso. Esse foi consequência da falta de expressões para o atraso de estol.

Outro estudo, trata-se de um modelo BEMT, mas com a teoria do momento, segundo Sun *et al.* (2016), aprimorada. As comparações dos métodos com o experimental mostraram que ambos os novos proporcionaram uma melhor previsão das forças normal e tangencial ao longo da pá do rotor em comparação com os clássicos correspondentes. Especificamente, a superestimação significativa das forças na região da ponta da pá observada com os métodos BEMT clássicos foi consideravelmente reduzida com a inclusão dos efeitos da velocidade radial.

Diferentemente, MacNeill e Verstraete (2017) apresentou uma metodologia aprimorada para modelar o desempenho de hélices de pequeno porte operando em baixos números de Reynolds. O banco de dados aerodinâmico estendido, incluindo os efeitos de altos ângulos de ataque e rotação, foi integrado a um modelo BEMT para prever o desempenho das hélices. Com isso, foi possível obter uma previsão significativamente mais precisa do desempenho de hélices de pequeno porte. No entanto, os resultados também apontam para a necessidade de mais dados experimentais de alta qualidade para perfis aerodinâmicos em baixos números de Reynolds e altos ângulos de ataque.

No experimento NREL Phase VI, Tangler (2002) analisou os efeitos de diferentes conjuntos de dados dos coeficientes de sustentação e arrasto do aerofólio S809, utilizando o BEMT. O estudo demonstrou que a seleção desses conjuntos de dados exerce influência crítica no comportamento aerodinâmico na região de estol. Além disso, evidenciou-se que o método não conseguiu reproduzir com precisão a distribuição de cargas reduzidas nas extremidades das pás e os efeitos de vórtices gerados próximo ao cubo da turbina. Essas limitações foram atribuídas à ausência de modelos de *stall delay* (atraso de estol) na metodologia, o que contribuiu para discrepâncias significativas nos resultados, especialmente em velocidades moderadas e elevadas.

Outro autor importante é o Dumitrescu *et al.* (2013), que propôs uma nova correção para o coeficiente de sustentação das pás da turbina eólica. Essa nova maneira de tratar os coeficientes considerou não só os efeitos tridimensionais e rotacionais, como também o decaimento viscoso adicional ao longo da sua geometria. Esse modelo resultou em ótimos resultados em baixas velocidades, porém ao ponto que se aumenta é observado que há um erro, continuando razoavelmente próximo. Por fim, foi possível capturar os efeitos, aproximando-se da física real do problema, não foi afetado pelo tamanho do rotor e é mais simples de implementar.

Além desse, Hamlaoui *et al.* (2018) também foi responsável por apresentar um novo modelo capaz de prever o atraso das turbinas eólicas de eixo horizontal. O autor implementou o BEMT com a ajuda do MATLAB e validou seus resultados com os dados experimentais do NREL Phase VI. A partir disso, foi observado que, especialmente na região próxima à raiz da pá, tal relação obteve melhores coeficientes de sustentação comparados ao Snel *et al.* (1993), principalmente a partir de $16 \frac{m}{s}$, que, diferente de outros, não sobrestimou a potência em velocidades maiores. Em conclusão, os resultados obtidos previram o torque e a potência com uma boa precisão, principalmente quando comparados a outros.

Entretanto, Breton *et al.* (2008) realizou a avaliação de diferentes correções para o

atraso do estol. Fundado nisso, foi observado o melhor desempenho da fórmula de Lindenburg (2003), em que o tratamento na região da ponta se mostrou único e benéfico. Entretanto, de modo geral, foi concluído que nenhum deles apresentava generalidade do problema físico, sendo a grande parte limitada pela teoria básica da camada limite.

Baseado no trabalho anterior, Kabir *et al.* (2022) ressaltou o quanto os mecanismos utilizados subestimavam ou superestimavam os coeficientes de sustentação nas velocidades elevadas, principalmente nas partes mais internas. Por sua vez, confirmando o explicitado anteriormente, Lindenburg (2003), mesmo apresentando erros significativos a $25 \frac{m}{s}$, apresentou bons resultados. Em síntese, uma nova forma para corrigir foi criada pelo autor, obtendo erros menores, especialmente em regiões longe da ponta da pá.

Agora, em referência a aplicações do QBlade, principalmente em turbinas de pequeno porte, Nakahara (2021) utilizou o software para analisar perfis NACA 0012, NACA 4412 e SD7080 em condições envolvendo uma velocidade de $3 \frac{m}{s}$. Esse estudo mostrou que a otimização apenas baseada na razão entre o coeficiente de sustentação e arrasto não é condição suficiente para garantir a maior eficiência de um aerofólio, precisando ainda considerar a sua faixa de operação.

Complementar a esse, Islam *et al.* (2019) projetou e simulou pás de turbina eólica de pequeno porte para regiões com velocidades baixas. Para tal, usou o QBlade junto a uma validação por meio do programa MATLAB usando o BEMT. Com isso, uma pá foi otimizada usando-se apenas os comprimentos das cordas e o ângulo de torção, conseguindo um coeficiente de potência máximo de 0,49. Além disso, ambos os programas usados apresentaram resultados parecidos, 0,49 e 0,48, respectivamente. Por último, destacou a simplicidade, viabilidade e eficácia para condições de vento fraco, apesar de ainda ver necessário o uso de CFD para melhores estimativas.

E por fim, em estudo recente, Dejene *et al.* (2024) investigou o desempenho de winglets com perfil aerodinâmico S809 na ponta da pá NREL Phase VI, utilizando as ferramentas QBlade e CFD. Embora não fosse o foco principal da pesquisa, os autores conduziram uma análise comparativa entre metodologias de previsão de potência, na qual o QBlade demonstrou uma variação de $\pm 11,69\%$ em relação aos resultados experimentais.

3 MODELOS MATEMÁTICOS

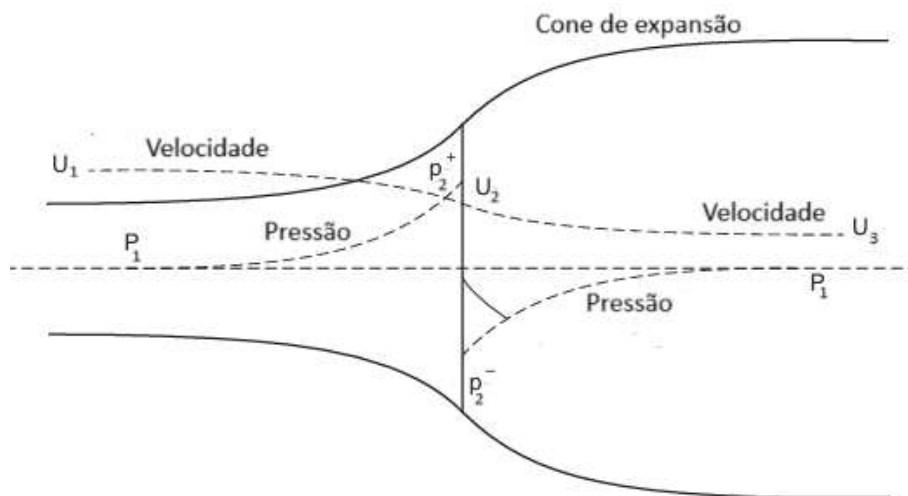
Neste capítulo, será detalhada a fundamentação matemática da teoria do momento do elemento de pá, método clássico utilizado para análise aerodinâmica de turbinas eólicas. A exposição iniciará com os princípios básicos do método, que combina a teoria de momento axial com a segmentação da pá em elementos finitos, avançando para as correções práticas — como modelos de perda de ponta e ajustes para escoamento turbulento —, consolidando assim uma estrutura analítica confiável para simulações numéricas.

Será explicitada, ainda, a relação direta entre o modelo teórico e sua implementação computacional, demonstrando como as equações algébricas, balanços de momento e relações geométricas — características centrais da BEMT — são convertidas em algoritmos iterativos.

3.1 Noções básicas da teoria do momento axial unidimensional e limite de Betz

A seguinte análise baseia-se no modelo de escoamento de Rankine, o qual utiliza um "disco atuador"; o disco é considerado ideal, ou seja, não há atrito nem efeitos da esteira rotativa (ALMEIDA, 2013). Além do mais, consoante ao Hansen (2008), a pressão atmosférica do ar P_1 próximo ao montante (ou à entrada) do rotor adquire um pequeno aumento para P_2^+ . Após uma queda descontínua no rotor, a pressão na jusante irá se recuperar continuamente até o nível atmosférico, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Disco atuador e cone de expansão.



Fonte: Adaptado de Burton *et al.* (2021).

Conforme Manwell *et al.* (2009), em todo o volume de controle é aplicada a conser-

vação do momento linear, chegando na Equação 3.1:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_3(\rho AU)_3. \quad (3.1)$$

Ainda em concordância com o autor citado, em tal análise o fluido é considerado homogêneo, incompressível e permanente, ou seja, o fluxo não varia com o tempo. Dessa forma, $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_3 = \dot{m}$ e a Equação 3.1 podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_3). \quad (3.2)$$

ou

$$T = \frac{1}{2}\rho A_d(U_1^2 - U_3^2) \quad (3.3)$$

Igualando a Equação 3.3 e a Equação 3.2, fazendo manipulações geométricas, tal que $(U_1^2 - U_3^2) = (U_1 - U_3)(U_1 + U_3)$ e reconhecendo que $\dot{m} = \rho A_2 U_2$, U_2 é representado conforme a Equação 3.4:

$$U_2 = \frac{U_1 + U_3}{2} \quad (3.4)$$

A partir de Sørensen *et al.* (2022) é introduzido o fator de indução axial, a , o qual representa a diminuição da velocidade do vento após sua energia ser transferida para o rotor, descrito na Equação 3.5.

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (3.5)$$

Se a for igual a zero, isso significa que não houve conversão de energia cinética, já que $U_2 = U_1$. Do mesmo modo, se U_2 for igual a zero, significa que as pás da turbina bloquearam todo o vento, não havendo transformação da energia em potência no eixo (ALMEIDA, 2013).

Fundamentado na Equação 3.5 e na Equação 3.4, é possível expressar U_1 e U_2 em função do fator de indução, conforme a equação 1 e 2.

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (3.6)$$

$$U_3 = U_1(1 - 2a) \quad (3.7)$$

Observa-se que quando $a > \frac{1}{2}$, a velocidade do vento após passar pelo rotor vai possuir velocidades negativas, de acordo com a Equação 3.7, o que fisicamente é impossível. À vista disso, a teoria é válida até quando $a = \frac{1}{2}$.

Adicionalmente, de acordo com Hansen (2008), o coeficiente de potência, então, é definido a partir da Equação 3.8.

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.8)$$

Derivando-se o coeficiente de potência, C_p , na Equação 3.8 em relação a a e igualando a zero, é possível descobrir em qual valor do fator de indução axial C_p é máximo, conhecido como o limite de Betz, atingido quando $a = \frac{1}{3}$, assim:

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} \approx 59,3\% \quad (3.9)$$

Para terminar, combinando a Equação 3.3, Equação 3.6 e Equação 3.7, tem-se o empuxo e o seu coeficiente:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_d U_1^2 \cdot 4a(1 - a) \quad (3.10)$$

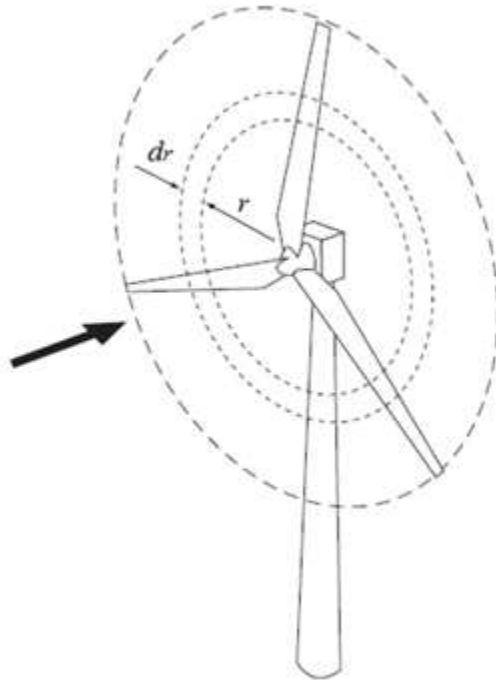
$$C_T = 4a(1 - a) \quad (3.11)$$

3.2 Teoria do elemento de pá

Segundo Almeida (2013), essa teoria parte da divisão da pá em N partes com comprimento dr . Ainda consoante o autor, em cada seção é calculada a força atuante por meio dos coeficientes bidimensionais: C_L e C_D , de acordo com o ângulo de ataque da respectiva seção transversal da pá. E por fim, efeitos tridimensionais são desprezados.

A Figura 9 exemplifica um rotor de um aerogerador girando com uma velocidade angular de ω , destacado também um elemento de pá com comprimento dr , distando r da base do rotor.

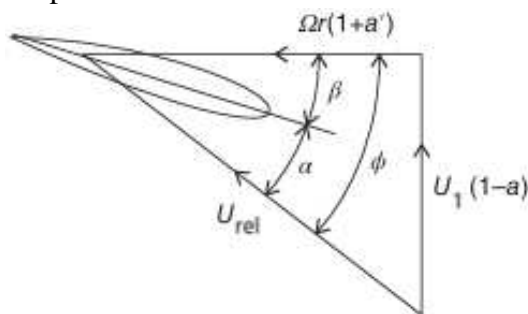
Figura 9 – Demonstração de um elemento de pá.



Fonte: Adaptado de Burton *et al.* (2021).

A velocidade relativa do vento U_{rel} é formada a partir de duas componentes: a velocidade do vento axial $U(1-a)$ e a velocidade do vento tangencial ao rotor $(1+a')\omega r$, conforme Figura 10. Segundo Manwell *et al.* (2009), $a' = \frac{\omega}{2\Omega}$, onde Ω é a rotação.

Figura 10 – Velocidades em um elemento da pá.



Fonte: Adaptado de Burton *et al.* (2021).

A partir da Figura 10, chega-se às seguintes relações:

$$U_{rel} = \sqrt{U_1^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1-a')^2} \quad (3.12)$$

$$\text{sen}(\phi) = \frac{U_1(1-a)}{U_{rel}} \quad (3.13)$$

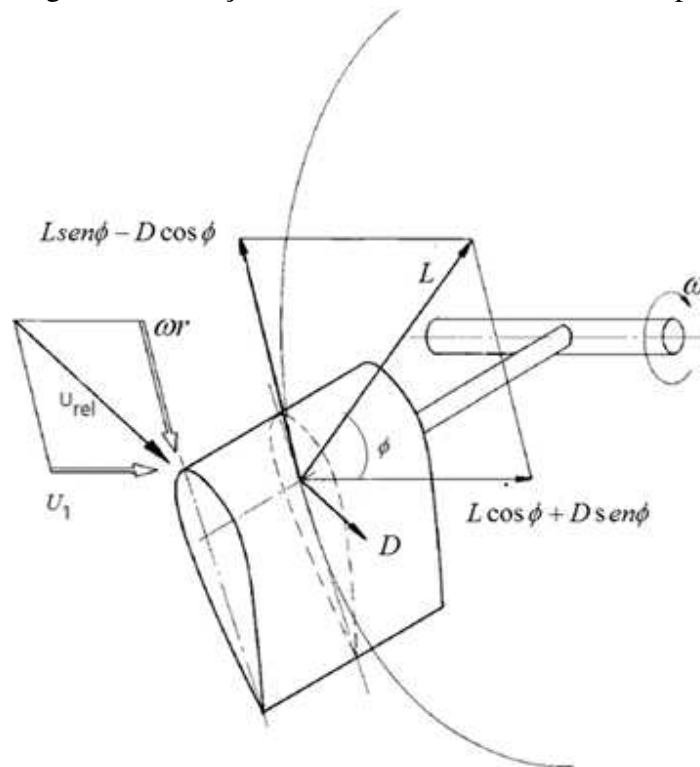
$$\cos(\phi) = \frac{\Omega^2 r^2 (1 - a')}{U_{rel}} \quad (3.14)$$

$$\tan(\phi) = \frac{U_1 (1 - a)}{\Omega^2 r^2 (1 - a')} \quad (3.15)$$

$$\alpha = \phi - \beta \quad (3.16)$$

Tais relações são importantes pois é possível calcular o ângulo de ataque com base na velocidade do vento em uma posição radial da pá, assim como por meio dos fatores de fluxo e da velocidade de rotação do rotor.

Figura 11 – Forças envolvidas em um elemento da pá.



Fonte: Adaptado de Hau e Renouard (2006).

Na Figura 11 é notável ainda as componentes da força normal, F_N , e tangencial F_T em um elemento da pá, além da força de arrasto e sustentação. Dessa maneira, em um elemento de comprimento dr , as seguintes expressões são válidas para a força de sustentação e arrasto:

$$dL = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c C_L dr \quad (3.17)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c C_D dr \quad (3.18)$$

E de acordo com Júnior (2017), para um rotor com uma quantidade B pás, a força normal e tangencial são dadas pela Equação 3.19 e Equação 3.20, respectivamente.

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad (3.19)$$

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) dr \quad (3.20)$$

Por fim, através da força tangencial aplicada a uma distância r do centro, é gerado um incremento no torque dado por (JÚNIOR, 2017):

$$dQ = r(dF_T) = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) r dr \quad (3.21)$$

3.3 Teoria do momento do elemento de pá

A teoria do momento do elemento de pá, segundo Almeida (2013) e Júnior (2017) parte do seguinte pressuposto:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma'}{4 \sin^2 \phi} \left[C_n - \frac{\sigma'}{4 \sin^2 \phi} C_t^2 \right] \quad (3.22)$$

Em que C_n indica o coeficiente de força normal, C_t o coeficiente de força tangencial e σ' a solidez local, dados pelas seguintes equações:

$$C_n = C_L \cdot \cos(\phi) + C_D \cdot \sin(\phi) \quad (3.23)$$

$$C_t = C_L \cdot \sin(\phi) - C_D \cdot \cos(\phi) \quad (3.24)$$

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.25)$$

Conforme Burton *et al.* (2021), por manipulações matemáticas chega-se a Equação 3.26.

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma' C_y}{4 \text{sen}(\phi) \text{cos}(\phi)} \quad (3.26)$$

Assim, o torque pode ser calculado após descobertos os fatores de indução; esses são encontrados através de iterações. E com isso, a potência também é encontrada pela seguinte relação:

$$P = \int_{r_h}^R \Omega \cdot dQ \quad (3.27)$$

3.4 Correção de perda de ponta

Segundo Almeida (2013), ao passo que o elemento da pá se afasta da raiz, mais vórtices são gerados atrás do rotor, ocasionando diminuição da eficiência. Além disso, esse modelo considera a existência do número infinito de pás; entretanto, em turbinas reais isso não é verdade. Para corrigir esse efeito, o método de Prandtl é aplicado, demonstrado a seguir (BRANLARD, 2017):

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{r \cdot \text{sin}(\phi)} \quad (3.28)$$

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (3.29)$$

Uma análise detalhada revela que f é 1 quando o número de pás tende ao infinito.

E, conseqüentemente, os fatores de indução são corrigidos da seguinte maneira (MANWELL *et al.*, 2024):

$$a = \frac{1}{\frac{4F \text{sen}^2(\phi)}{\sigma C_n} + 1} \quad (3.30)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \text{sen}(\phi) \text{cos}(\phi)}{\sigma C_t} - 1} \quad (3.31)$$

3.5 Correção de Glauert

Segundo Manwell *et al.* (2009), além da correção anterior, ainda é necessário corrigir o método quando a pá entra em estado turbulento, caso em que a é maior que 0,4, deixando o padrão do escoamento mais complexo, não sendo previsto pela teoria. Para resolver isso, Glauert a partir de estudos experimentais em helicópteros, criou uma relação capaz de ser aplicada individualmente em cada elemento da pá. Assim, caso tal efeito ocorra, o fator de indução axial é corrigido pela seguinte equação:

$$a = \left(\frac{1}{F} \right) [0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_T)}] \quad (3.32)$$

O fator de indução tangencial continua sendo calculado pela Equação 3.31.

E o coeficiente de empuxo é dado por (MANWELL *et al.*, 2009):

$$C_T = \frac{\sigma'(1-a)^2 [C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi)]}{\sin^2(\phi)} \quad (3.33)$$

No entanto, no QBlade é usada a modificação de Marshall Buhl (MARTEN *et al.*, 2013). Conforme Buhl (2005), a Equação 3.30 e Equação 3.33 são modificadas da seguinte maneira:

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \quad (3.34)$$

e

$$C_T = \frac{8}{9} + \left(4F - \frac{40}{9}\right)a + \left(\frac{50}{9} - 4F\right)a^2 \quad (3.35)$$

3.6 Correção para alto ângulos de ataque

Entretanto, segundo Oliveira *et al.* (2023), o modelo clássico tem problemas em relação a altos ângulos de ataque, vista a falta de valores experimentais e limitações computacionais, já que tanto esses quanto o ângulo de incidência são proporcionais à velocidade do fluido, dado o ângulo de montagem constante. Assim, para extrapolar valores do coeficiente de sustentação e

arrasto, dada a incapacidade do método dos painéis quando há separação do fluxo, é usado o método de Viterna.

Assim, após serem obtidos dados do aerofólio, é necessário definir o ângulo de estol α_{estol} , seu coeficiente de sustentação $C_{L_{estol}}$, e coeficiente de arrasto $C_{D_{estol}}$, para extrapolar quando não houver esses dados. Dessa forma, as equações podem ser solucionadas (MAHMUDDIN *et al.*, 2017).

$$C_L = A_1 \sin(2\alpha) + A_2 \frac{\cos^2(\alpha)}{\sin(\alpha)} \quad (3.36)$$

$$C_D = B_1 \sin^2(\alpha) + B_2 \cos(\alpha) \quad (3.37)$$

Onde

$$C_{D_{max}} = 1,11 + 0,018AR \quad (3.38)$$

$$A_1 = \frac{C_{D_{max}}}{2} \quad (3.39)$$

$$B_1 = C_{D_{max}} \quad (3.40)$$

$$A_2 = (C_{L_{estol}} - C_{D_{max}} \sin(\alpha_{estol}) \cos(\alpha_{estol})) \frac{\sin(\alpha_{estol})}{\cos^2(\alpha_{estol})} \quad (3.41)$$

$$B_2 = \frac{(C_{D_{estol}} - C_{D_{max}} \sin^2(\alpha_{estol}))}{\cos(\alpha_{estol})} \quad (3.42)$$

De acordo com o Oliveira *et al.* (2023), a variável AR na Equação 3.38 é denominada como a relação de aspecto entre raios e a corda da pá, e é recomendado que assuma o valor igual a 10 (MAHMUDDIN *et al.*, 2017).

3.7 Correção 3D

Segundo Hamlaoui *et al.* (2018), há diferenças significativas entre os fluxos de ar 2D e 3D. Em pás rotativas, os coeficientes de sustentação próximos à base são muito superiores aos registrados em condições estáticas. Como modelos 2D não incluem os efeitos da rotação, são necessárias correções para simular fenômenos 3D, como o Stall-Delay. Esse efeito faz com que a sustentação seja máxima na região interna da pá e diminua progressivamente em direção à ponta, devido à interação entre forças centrífugas e o fluxo aerodinâmico.

Desse modo, estudos ainda são realizados para entender o fenômeno e melhorar a predição, como por exemplo os seguintes autores: Snel *et al.* (1993), Corrigan e Schillings (1994), Chaviaropoulos e Hansen (2000), Lindenburg (2003), Hamlaoui *et al.* (2018), Kabir *et al.* (2022).

Considerando que no software empregado no trabalho será usado o modelo de Snel *et al.* (1993), esse será melhor explicado. Segundo Breton *et al.* (2008), os coeficientes de sustentação são corrigidos da seguinte forma:

$$C_{L,3D} = C_{L,2D} + g_{C_l} \Delta C_l \quad (3.43)$$

Em que ΔC_l é a diferença entre C_L que seria obtido se o fluido não se separasse, Breton *et al.* (2008) considera $C_L = 2\pi \cdot (\alpha - \alpha_{sustentao=0})$ e $C_{L,2D}$ é o coeficiente de sustentação sem o efeito rotacional. Já o g_{C_l} é dado por:

$$g_{C_l} = 3 \left(\frac{c}{r} \right)^2 \quad (3.44)$$

3.8 Simulação BEM das geometrias

Para fim de demonstrar o funcionamento do algoritmo foi usado o formato clássico baseado no livro do Manwell *et al.* (2009) e no do Hansen (2008).

O algoritmo na fase inicial precisa de uma estimativa dos valores do ângulo de incidência, fator de indução axial e tangencial. Segundo Hansen (2008), tipicamente pode-se considerar $a = a' = 0$, e o ângulo de incidência com a seguinte equação:

$$\varphi_i = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (3.45)$$

Definindo a razão de velocidade local e razão de velocidade da ponta a partir da Equação 3.46 e Equação 3.47. Tem-se:

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R} \quad (3.46)$$

e

$$\lambda = \frac{R\Omega}{U_\infty} \quad (3.47)$$

O fatores de indução então são calculados a partir da Equação 3.48 e Equação 3.49.

$$a_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{4 \cdot \text{sen}^2(\varphi_{i,1})}{\sigma_i \cdot C_{L,design} \cdot \text{cos}\varphi_{i,1}}\right]} \quad (3.48)$$

Aqui $C_{L,design}$ é onde a razão entre C_L e C_D é máxima.

$$a'_i = \frac{1 - 3a_{i,1}}{(4a_{i,1}) - 1} \quad (3.49)$$

Após determinar esses valores, começam as iterações, em que o i indica qual é o elemento da pá e j indica a quantidade máxima de iterações até que a e a' convergem até uma tolerância aceitável e . Para $j = 1$,

$$\varphi_{i,j} = \tan^{-1} \frac{U(1 - a_{i,j})}{(1 + a'_{i,j})\lambda_{r,i}} \quad (3.50)$$

$$F_{i,j} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left[\exp\left(-\left\{\frac{\left(\frac{B}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{r_i}{R}\right)\right]}{\left(\frac{r_i}{R}\right) \text{sen}\varphi_{i,j}}\right\}\right) \right] = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos^{-1} \left(\frac{R - r_i}{r_i \text{sen}\varphi_{i,j}}\right) \quad (3.51)$$

Com isso, são determinados valores para $C_{L,i,j}$ e $C_{D,i,j}$ em função do ângulo de ataque, de acordo com a

$$\alpha = \varphi_{i,j} - \beta_i \quad (3.52)$$

A partir disso, é possível calcular o coeficiente de empuxo local,

$$C_{T_r,i,j} = \frac{\sigma'(1 - a_{i,j})^2 (C_{L,i,j} \cos \varphi_{i,j} + C_{D,i,j} \sin \varphi_{i,j})}{\sin^2 \varphi_{i,j}} \quad (3.53)$$

Ainda é necessário atualizar os fatores de indução. Se $C_{T_r,i,j} < 0,96$:

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{1 + \frac{4F_{i,j} \sin^2(\varphi_{i,j})}{\sigma' C_{L,i,j} \cos(\varphi_{i,j})}} \quad (3.54)$$

Se $C_{T_r,i,j} > 0,96$

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{F_{p,i}} [0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_{T_r,i,j})}] \quad (3.55)$$

E para o fator tangencial

$$a'_{i,j+1} = \frac{1}{\frac{4F_i \cos(\varphi_i)}{\sigma' C_{L,i,j}} - 1} \quad (3.56)$$

Uma vez que os fatores de indução estiverem com uma tolerância desejável, é possível calcular os outros parâmetros, especialmente a potência. Caso isso não aconteça, repete-se a partir da Equação 3.50.

Por fim, a potência é encontrada a partir da Equação 3.27 e o coeficiente de performance do sistema é encontrado pela seguinte relação:

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_r}^{\lambda} F \sin^2(\varphi) (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left[1 - \frac{C_D}{C_L} \cot \varphi \right] \lambda^2 d\lambda_r \quad (3.57)$$

Lembrando que C_p representa a fração da potência disponível no vento que o rotor de uma turbina consegue extrair (MANWELL *et al.*, 2024).

4 METODOLOGIA

No presente capítulo, será desenvolvida uma abordagem metodológica, contemplando as configurações parametrizadas do software Qblade, ferramenta para simulações aerodinâmicas e análise de desempenho de turbinas eólicas. Além da explanação técnica sobre os ajustes do programa, serão descritos os procedimentos experimentais adotados para a turbina de grande porte NREL Phase VI, referência internacional em estudos de energia eólica, bem como para uma turbina de pequena escala, cujos dados comparativos enriquecem a análise de viabilidade e eficiência.

4.1 Experimento NREL Phase VI

O experimento NREL Phase VI é um marco fundamental na pesquisa em energia eólica, conduzido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos Estados Unidos na década de 1990. Seu objetivo principal foi gerar dados experimentais detalhados para validar e aprimorar modelos computacionais de turbinas eólicas, especialmente em condições operacionais complexas, como escoamento turbulento, cargas dinâmicas e efeitos aerodinâmicos não estacionários (HAND *et al.*, 2001). Além disso, partindo para a parte operacional, a pá possui um diâmetro de 10 metros com o perfil formado apenas pelo aerofólio S809. A velocidade angular é constante e igual a 72 RPM Martinez *et al.* (2005). Ademais, possui um *pitch angle* igual a 3 graus, seguindo o estudo da sequência S do experimento. E a geometria desse problema é encontrada na Tabela 1.

Observada a falta de dados do aerofólio para um número de Reynolds baixo, foi usado apenas o de $1 \cdot 10^6$, mas essa simplificação do problema é possível em virtude de grande parte dos elementos da pá encontrarem-se perto desse valor (MARTINEZ *et al.*, 2005).

4.2 Experimento da turbina de pequeno porte

Este experimento tem como objetivo analisar uma turbina de pequeno porte. Para tal, foram empregadas duas turbinas com diâmetro de 3 metros, mantendo-se a velocidade do vento constante em 10 m/s, conforme estabelecido por Anderson *et al.* (1982). Este estudo é frequentemente utilizado na validação do método BEMT devido à sua simplicidade e às condições favoráveis de simulação, especialmente em razão da baixa velocidade do vento, como destacado por Wood (2011). A geometria e aerofólio podem ser encontrados na Tabela 2. E de

Tabela 1 – Dados geométricos da pá - NREL Phase VI

Raio local (m)	Corda (m)	Ângulo de torção (°)	Aerofólio	Eixo de torção (% corda)
0,508	0,218	20,04	Circular	50
0,660	0,218	18,074	Circular	50
0,883	0,183	17,601	Circular	35.9
1,008	0,349	17,365	S809	33.5
1,067	0,441	17,129	S809	31.9
1,133	0,544	16,183	S809	30
1,257	0,737	15,947	S809	30
1,343	0,728	15,710	S809	30
1,510	0,711	14,292	S809	30
1,648	0,697	11,909	S809	30
1,952	0,666	7,979	S809	30
2,257	0,636	5,308	S809	30
2,343	0,627	4,715	S809	30
2,562	0,605	3,425	S809	30
2,867	0,574	2,083	S809	30
3,172	0,543	1,150	S809	30
3,185	0,542	1,115	S809	30
3,476	0,512	0,494	S809	30
3,781	0,482	-0,015	S809	30
4,023	0,457	-0,381	S809	30
4,086	0,451	-0,475	S809	30
4,391	0,420	-0,920	S809	30
4,696	0,389	-1,352	S809	30
4,780	0,381	-1,469	S809	30
5,000	0,358	-1,775	S809	30

Fonte: Adaptado de Hand *et al.* (2001).

forma simples, foi implementada pela configuração rápida do QBlade de aerofólios NACA .

Já em relação ao número de Reynolds, a partir do trabalho de Wood (2011) e assim como no caso anterior, foi escolhido um valor que mais se aproxima na maior parte da pá, a partir disso, foi escolhido o valor de $3 \cdot 10^5$.

4.3 QBlade

O QBlade é um software de código aberto e avançado, desenvolvido com foco em construção de rotores de forma acessível e clara, além de simular turbinas em diferentes ambientes, como análise aero-servo-hidro-elásticas. Esse possui mais de uma década de aperfeiçoamento, sendo amplamente utilizado por engenheiros, pesquisadores e estudantes no processo de criação e testes de turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical (MARTEN *et al.*, 2021).

No software é utilizado o XFOIL, um método de painel acoplado viscoso-inviscido desenvolvido por Mark Drela e Michael Giles no MIT, como uma ferramenta central para a análise aerodinâmica de aerofólios. Em relação ao QBlade, o XFOIL desempenha um papel essencial ao fornecer dados sobre o desempenho aerodinâmico das seções das pás da turbina

Tabela 2 – Dados geométricos da pá de pequeno porte

Raio local (cm)	Corda (cm)	Ângulo de torção (°)	Aerofólio
13,33	25,02	24,21	NACA 4412
23,25	23,18	21,06	NACA 4412
29,75	19,98	15,87	NACA 4412
36,25	17,32	11,292	NACA 4412
42,75	15,12	8,96	NACA 4412
49,25	13,33	6,77	NACA 4412
55,75	11,86	5,18	NACA 4412
62,25	10,67	4,02	NACA 4412
68,75	9,71	3,16	NACA 4412
75,25	8,92	2,49	NACA 4412
81,75	8,26	1,93	NACA 4412
88,25	7,71	1,44	NACA 4412
94,75	7,23	0,99	NACA 4412
101,25	6,80	0,59	NACA 4412
107,75	6,41	0,25	NACA 4412
114,25	6,04	-0,06	NACA 4412
120,75	5,70	-0,36	NACA 4412
127,25	5,38	-0,67	NACA 4412
133,75	5,08	-0,98	NACA 4412
140,25	4,84	-1,28	NACA 4412
146,75	4,66	-1,59	NACA 4412
150,0	4,60	-1,74	NACA 4412

Fonte: Adaptado de Wood (2011)

(MARTEN *et al.*, 2013; DRELA; GILES, 1987). E para terminar, é usado o método BEMT com as correções citadas na seção 3.4, seção 3.6, seção 3.7, tornando-se uma ferramenta mais confiável e rápida para simulações (MARTEN *et al.*, 2013).

4.4 Metodologia de implementação do QBlade no experimento NREL Phase VI

O primeiro passo iniciou-se com a obtenção das coordenadas polares do aerofólio para efetuar o desenho do aerofólio, encontrado no Apêndice C e Apêndice D. Além disso, no QBlade, é comum utilizar a integração com o XFOIL, por causa de sua fácil implementação e velocidade de convergência. Entretanto, no estudo específico da turbina eólica NREL Phase VI, o XFOIL apresentou limitações significativas. Essas restrições provavelmente estão associadas à dificuldade do método potencial em modelar escoamentos turbulentos, separações de camada limite pronunciadas ou efeitos tridimensionais presentes no experimento real, o que comprometeu a precisão dos resultados teóricos.

Diante dessa divergência entre os dados simulados e as observações práticas, optou-se por priorizar dados experimentais bidimensionais do aerofólio S809, amplamente validados em estudos anteriores e reconhecidos por sua aplicação em pás de turbinas eólicas. Os dados são

encontrados Apêndice A e Apêndice B.

Além disso, ainda é necessário extrapolar os dados até os intervalos de -180° até 180° , uma vez que o ângulo de ataque pode assumir valores grandes, os quais dados experimentais convencionais, obtidos em túneis de vento, não alcançam, normalmente por se limitar a faixas restritas (por exemplo, -15° a 20°), devido às dificuldades técnicas e custos associados à medição de escoamentos altamente separados ou transientes em ângulos extremos.

Figura 12 – Configurações V-terna - NREL Phase VI.

The image shows a software configuration window with three main sections:

- Range of original polar:** Contains two spinners. The 'min' spinner is set to -45.00 and the 'max' spinner is set to 90.00.
- Finetuning of Polar:** Contains a label 'CD 90' and a spinner set to 1.80.
- Finetuning of Decomposition:** Contains two spinners. The 'St+' spinner is set to 20.0 and the 'St-' spinner is set to -20.0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 12, o *Range of original polar* trata de quais dados da polar criada vão ser usados para interpolar, esse é escolhido automaticamente, o *Finetuning of polar* é o valor que o coeficiente de arrasto possui no ângulo de 90° , esse mantido padrão, visto testes anteriormente realizados. Já o *Finetuning of Decomposition* especifica os ângulos em que ocorrem estol, tanto o negativo como o positivo, esse foi mantido padrão pois os dados do experimento já cobrem essa parte. Depois disso, para criar o aerofólio de forma circular, é necessário definir o número de Reynolds, no caso semelhante ao do experimento do perfil S809 e o coeficiente de arrasto foi mantido como padrão, conforme Figura 13.

Figura 13 – Configurações *Circular Foil* -NREL Phase VI.

The image shows a dialog box titled 'Create a Circular...' with the following fields and buttons:

- Airfoil Name:** Text box containing 'Circular_Foil'.
- Drag Coefficient:** Text box containing '1.2'.
- Reynolds Number:** Text box containing '1000000'.
- Buttons:** 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, o software permite a criação da pá, sendo apenas necessário o raio, a corda e o ângulo de torção de cada elemento que compõe a pá. Antes disso, ainda foi necessário, nas opções avançadas, configurar em qual parte de cada corda será o eixo do ângulo de torção, conforme Figura 14. A Tabela 1 possui os valores usados. A Figura 15 mostra a pá resultante para a simulação.

Figura 14 – Geometria da pá NREL Phase VI no QBlade.

Basic Blade Design		Advanced Blade Design		
Active Elements:				
New		Edit		Delete
Blade Damage:				
New		Edit		Delete
	Position [m]	IP Offset [m]	OOP Offset [m]	PAxis [%c]
1	0.508	0.0000	0.0000	0.5000
2	0.6600	0.0000	0.0000	0.5000
3	0.8830	0.0000	0.0000	0.5000
4	1.0080	0.0000	0.0000	0.3590
5	1.0670	0.0000	0.0000	0.3350
6	1.1330	0.0000	0.0000	0.3190
7	1.2570	0.0000	0.0000	0.3000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Geometria da pá NREL Phase VI no QBlade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Partindo-se agora para a página de simulação *Turbine BEM*, foi configurado o tipo e as especificações da turbina, como demonstrado na Figura 16. Uma observação a ser feita é que o *V Cut In* e *V Cut Out* foram definidos, respectivamente, como 3,5 m/s e 30 m/s para observar melhor o comportamento da curva.

Por último, os parâmetros de simulação definidos são demonstrados na Figura 17. E como pode ser observado, foi adotada a densidade e a viscosidade cinemática, respectivamente de $1,225 \frac{kg}{m^3}$ e $1,81 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$, dadas as características do escoamento. Além disso, para melhorar a discretização, foi adotado 100 elementos para discretizar a pá. E também houve um incremento do número de iterações para 1000, com a função de garantir maior capacidade de convergência

Figura 16 – Configurações do *Turbine BEM* no QBlade.

The image shows a configuration window for a turbine in QBlade. It is divided into two main sections: 'Turbine Type' and 'Turbine Specification'.

Turbine Type

- Power Regulation:**
 - Stall Control
 - Pitch Control
 - Prescribed P_t
- Transmission:**
 - Single Speed
 - Dual Speed
 - Variable Speed
 - Prescribed R_t

Turbine Specification

V Cut In	3.5	m/s
V Cut Out	30	m/s
Rot. Speed	72	rpm
Fixed Pitch	3	deg
Loss Factor	0	0-1
Fixed Losses	0	W

Fonte: Elaborado pelo autor.

do método. Para terminar, no ajuste das variáveis, a tolerância e o fator de relaxamento foram deixados de forma padrão.

Figura 17 – Configurações da simulação do NREL Phasse VI no QBlade.

The image shows the 'Define BEM Parameters' dialog box in QBlade. It includes a 'Simulation Name' field and a table of parameters.

Simulation Name: New Turbine (3) Simulation (2)

Corrections	Variables	Units
<input type="checkbox"/> DTU Poly BEM	10	Wind Speed [m/s]
<input checked="" type="checkbox"/> Prandtl Tip Loss	0	Collective Pitch [deg]
<input checked="" type="checkbox"/> 3D Correction	1.225	Density [kg/m ³]
	0.0000181	Kinematic Viscosity [m ² /s]
	100	Discretize Blade into N Elements
	1e-06	Max Epsilon for Convergence
	1000	Max Number of Iterations
	0.1	Relax. Factor

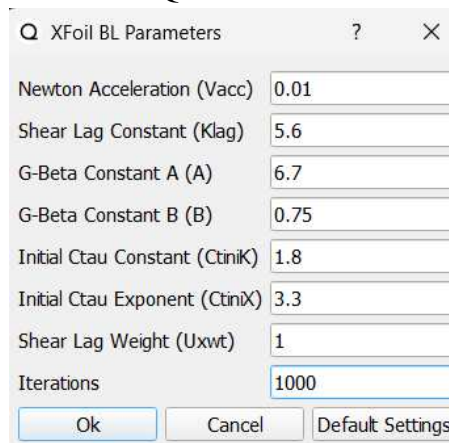
Buttons: Create

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Metodologia de implementação do QBlade no experimento da turbina pequena

Primeiramente, foi necessário configurar o ambiente do XFOIL. A principal e única alteração realizada foi o ajuste do número máximo de iterações para 1000, conforme ilustrado na Figura 18. Um número maior de iterações permite que o algoritmo do método de painéis refine suas soluções, resultando em dados mais precisos e confiáveis (SILVEIRA, 2023). Após a configuração inicial, procedeu-se com a geração de uma polar aerodinâmica para o número de Reynolds de $3 \cdot 10^5$.

Figura 18 – Configurações do XFOIL do QBlade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A polar foi obtida variando-se o ângulo de ataque em um intervalo pré-definido, gerando as curvas dos coeficientes de sustentação e arrasto. Esse intervalo foi definido a partir da Tabela 3, escolhendo-se a faixa de -8 a 15, e para o restante foi usada a correção para altos ângulos de ataque.

Tabela 3 – Estudos relacionados a precisão do XFOIL.

Estudo	Faixa de ângulo de ataque (°)	Observações
Belfkira <i>et al.</i> (2019)	-8 a 8	Boa concordância com dados experimentais
Drela (1989)	Até 15-20	Projetado para fluxos ligados

Fonte: Elaborado pelo autor.

A extrapolação das curvas teve como ajuste o mesmo da Figura 12, entretanto na parte *Range of original polar*, teve o mínimo igual a $-7,5^\circ$ e o máximo igual a $15,00^\circ$, em concordância com a Figura 20.

Agora, diferentemente da metodologia descrita na seção 4.4, foi necessário configurar a simulação para uma única velocidade específica, alinhando-se às condições experimentais

Figura 19 – Configurações da extra-polação Viterna.

Range of original polar

min -7.50 max 15.00

Finetuning of Polar

CD 90 1.80

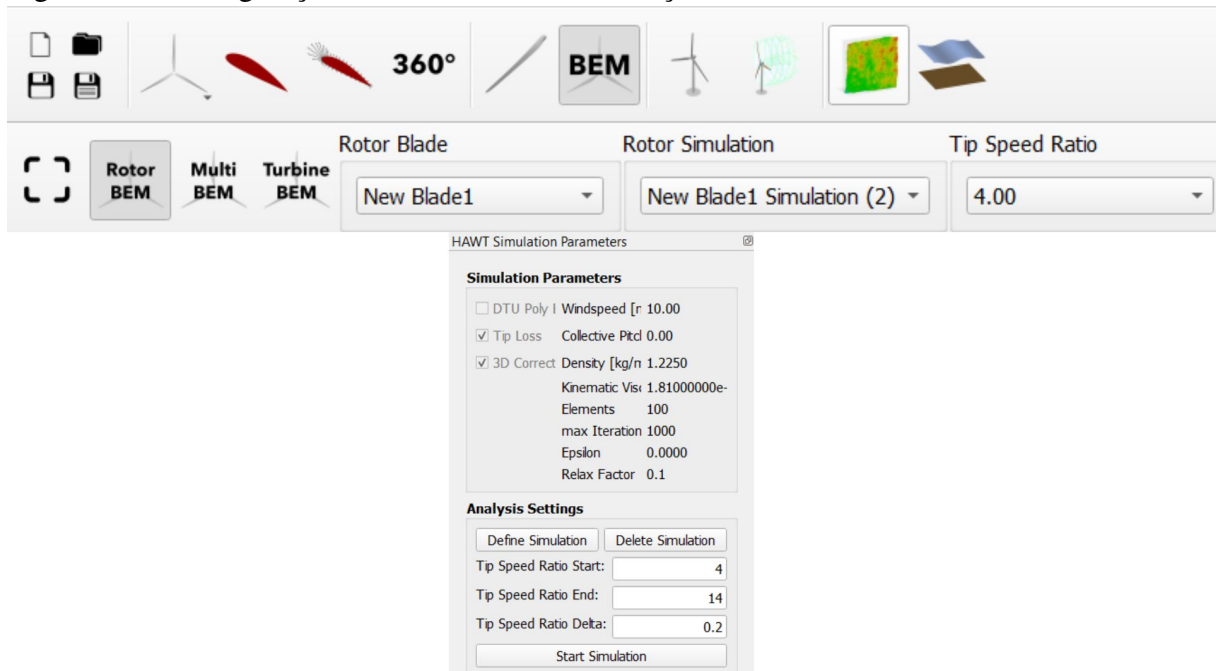
Finetuning of Decomposition

St+ 20.0 St- -20.0

Fonte: Elaborado pelo autor.

disponíveis; isso é feito usando o *Rotor BEM* do software. Essa restrição deve-se à necessidade de validar os resultados do modelo computacional diretamente com dados empíricos coletados em um regime operacional definido. Além disso, para aprimorar a análise comparativa, foram adotadas duas configurações distintas: simulação com correção de perda de ponta e usando essa adicionada com a correção 3D.

Figura 20 – Configurações do *Rotor BEM* e simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A adoção dessas duas configurações permitiu avaliar a sensibilidade dos resultados simulados às diferentes modelagens de correção, comparando-as criticamente com os dados experimentais para identificar qual abordagem reproduz com maior fidelidade o comportamento

real do sistema em estudo. Por último, a geometria é demonstrada na Figura 21, criada a partir da Tabela 2.

Figura 21 – Geometria da pá pequena.



Fonte: Elaborado pelo autor.

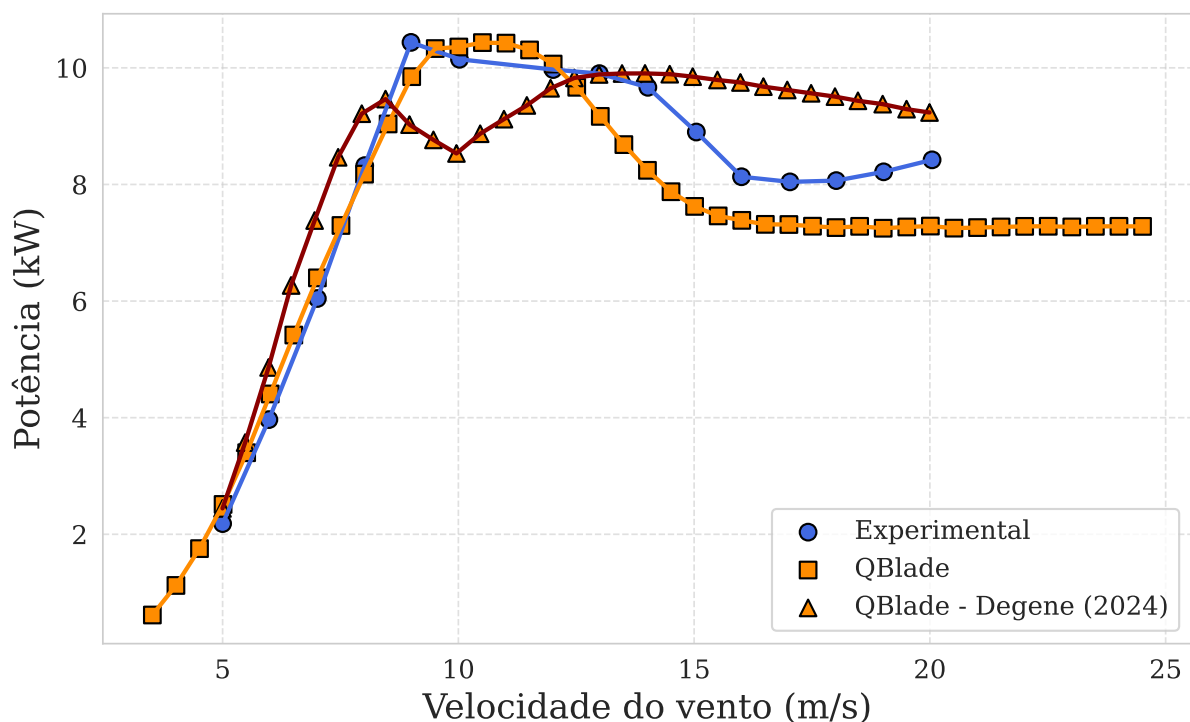
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a descrição metodológica, este capítulo apresenta uma análise crítica e sistemática dos resultados obtidos em cada experimento simulado no QBlade, explorando as variações observadas e suas implicações teórico-práticas. Os dados são discutidos em perspectiva comparativa, evidenciando como as condições específicas de cada cenário — como parâmetros operacionais, geometria das pás e regimes de vento — influenciaram os desempenhos aerodinâmicos e energéticos. Essa abordagem permite não apenas validar o modelo teórico proposto, mas também identificar padrões, discrepâncias e limites de aplicabilidade da metodologia adotada.

5.1 Avaliação da potência através do NREL Phase VI

Em relação à predição da potência, ao analisar de forma qualitativa a Figura 22, é possível notar que em velocidades baixas, houve boa concordância entre o simulado e os dados experimentais pela configuração do QBlade do trabalho, destacado por quadrados. No entanto, a partir de velocidades maiores, o software perde a capacidade de prever a potência. Assim, do mesmo modo que Dejene *et al.* (2024), limitações tais como a falta de assimilação do algoritmo em prever efeitos complexos do atraso de estol introduziram erros.

Figura 22 – Potência em relação ao vento do QBlade e experimento NREL Phase VI.



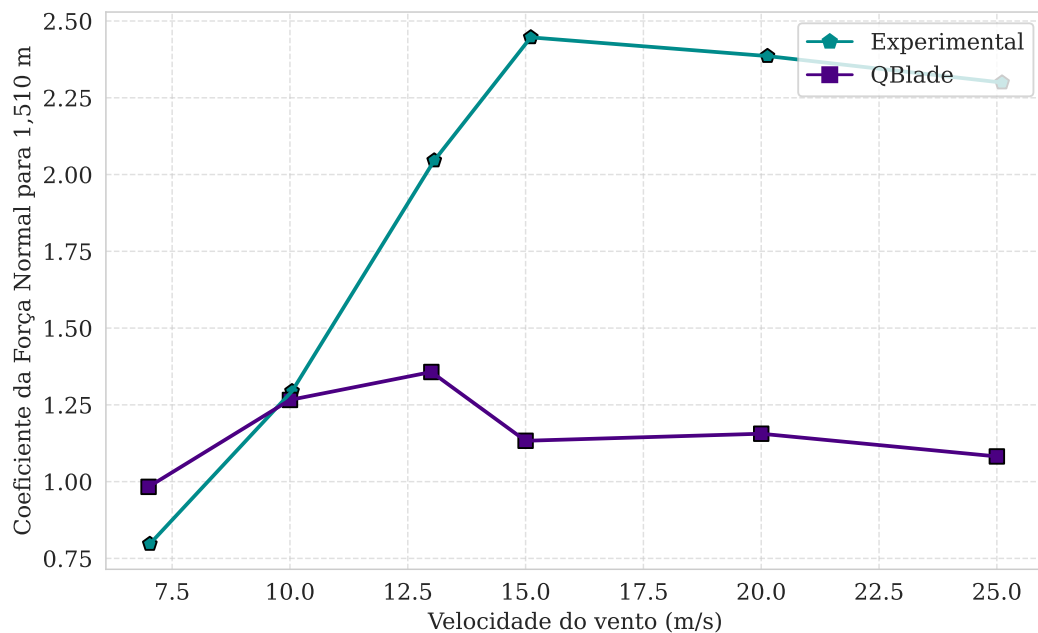
Fonte: Elaborado pelo autor.

Agora, em comparação ao trabalho de Dejene *et al.* (2024), foi notado que os dados de entrada do modelo desse trabalho apresentaram um melhor comportamento, ou tendência, da curva de potência, assim como melhor precisão em velocidades mais baixas a moderadas, especificamente o intervalo aproximado de $5 \frac{m}{s}$ e $12,5 \frac{m}{s}$.

5.2 Avaliação do coeficiente da força normal e força tangencial do NREL Phase VI

Na Figura 23, resultados do coeficiente de força normal no elemento da pá de raio igual a 1,510 metros são apresentados em diferentes configurações de vento. No primeiro momento, fica bem aparente a disparidade em condições moderadas a altas. Esse efeito também é observado por diferentes simulações em Simms *et al.* (2001). A maior causa desse erro é o aumento do efeito de atraso de estol e um comportamento característico da limitação da correção 3-D implementada no software, o qual não consegue prever tal reação (BRETON *et al.*, 2008).

Figura 23 – Coeficiente de força normal no raio de 1,510 m.

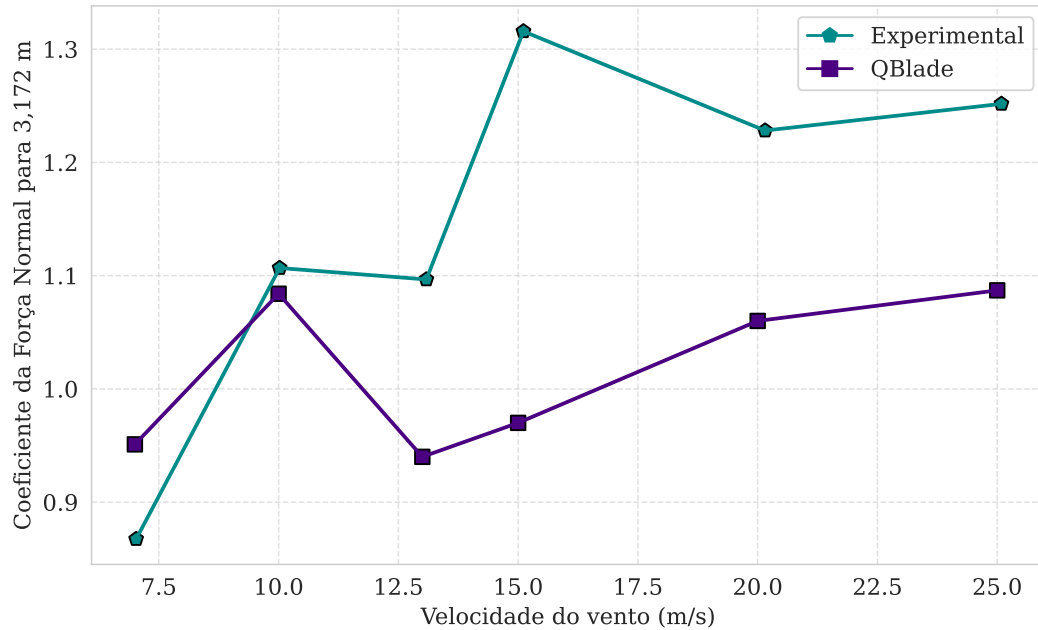


Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, um contraste é observável em velocidades mais baixas em respeito à exatidão dos dados, nas quais os efeitos tridimensionais são menos acentuados e regimes de escoamento menos turbulentos (TANGLER, 2002).

Agora, analisando a Figura 24, que diz respeito à parte da pá a 3,172 metros, percebe-se uma evidente divergência. Segundo Simms *et al.* (2001), nessa parte não são observadas perdas das pontas, atraso do estol e efeitos tridimensionais mais fortes. No entanto, os modeladores ainda

Figura 24 – Coeficiente de força normal no raio de 3,172 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

subestimaram as cargas produzidas. E assim, como outros autores, esse trabalho subestimou as forças no sentido normal.

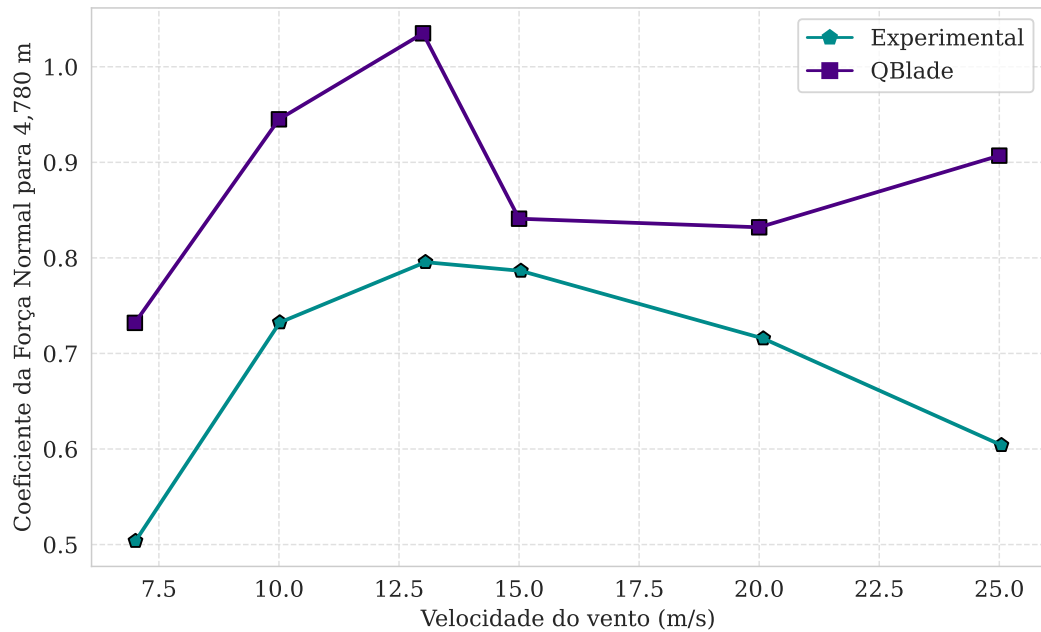
Ainda sobre a força normal, a Figura 25 mostra dados sobre o seu comportamento à distância de 4,780 metros. Nessa parte, por razão do número finito de pás, é esperado que ocorra a redução da sustentação, produzindo menos energia próxima à ponta da pá (MANWELL *et al.*, 2024). Por isso, é aplicada uma correção para corrigir essa perda. No entanto, do mesmo modo que na literatura, o programa ainda superestimou os valores.

Na Figura 26, assim como observado para o coeficiente de força normal no raio de 1,510 m, o coeficiente de força tangencial também exibiu discrepâncias significativas entre os dados experimentais e os resultados da simulação. Isso está associado à dependência do coeficiente de força tangencial em relação ao coeficiente de arrasto, em que ângulos de incidência reduzidos, particularmente em situações de estol ou turbulência, exercem influência mais significativa (BURTON *et al.*, 2021).

Desse modo, por falta de uma correção mais pronunciada dos coeficientes de arrasto, ocorreram maiores erros na modelagem da força tangencial. Essas falhas também foram observadas por Simms *et al.* (2001), mas de forma menos acentuada, evidenciando imprecisões maiores por parte do algoritmo empregado.

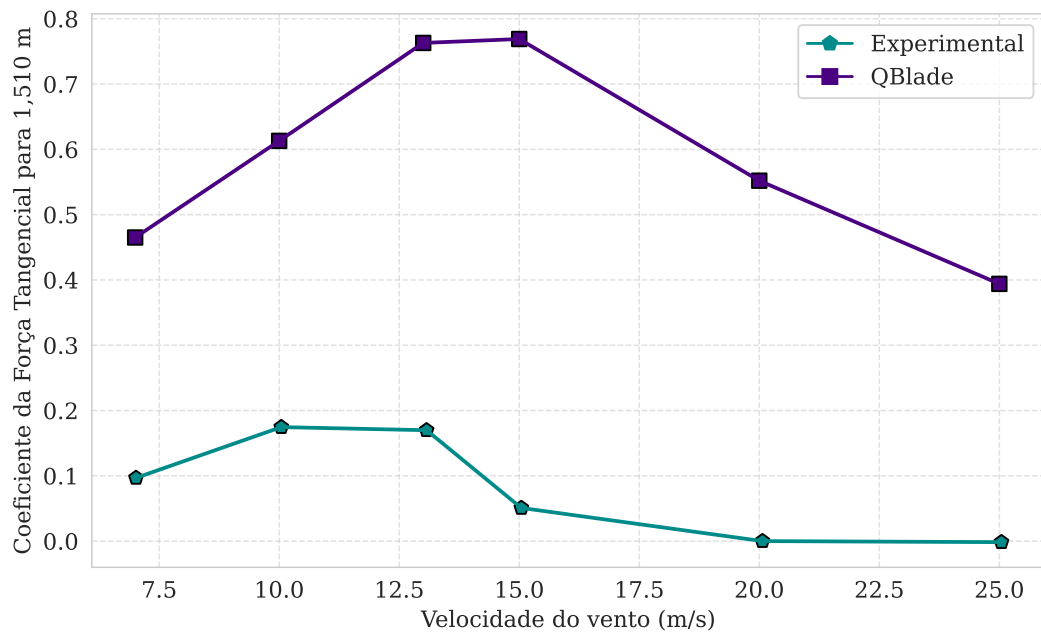
Além disso, diferentemente da Figura 24, a Figura 27 apresenta valores maiores do que os experimentais, com um erro significativo, algo não esperado por razão de essa região

Figura 25 – Coeficiente de força normal no raio de 4,780 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Coeficiente de força tangencial no raio de 1,510 m.

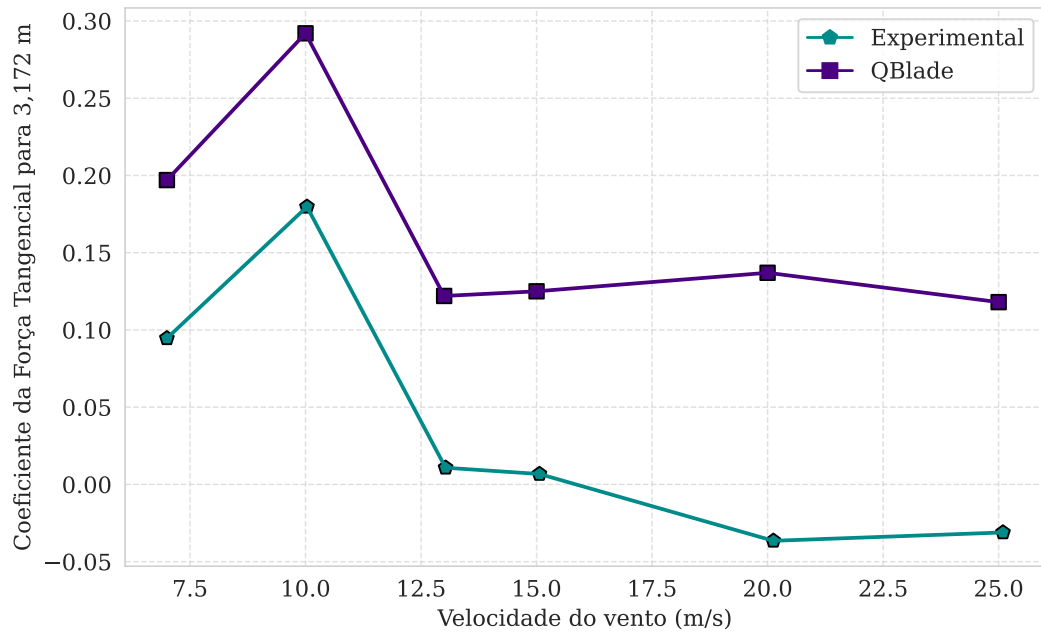


Fonte: Elaborado pelo autor.

mais no meio não apresentar efeitos tão complexos como nos extremos. Entretanto, da mesma forma, Simms *et al.* (2001) observou esse comportamento na predição de outros modeladores.

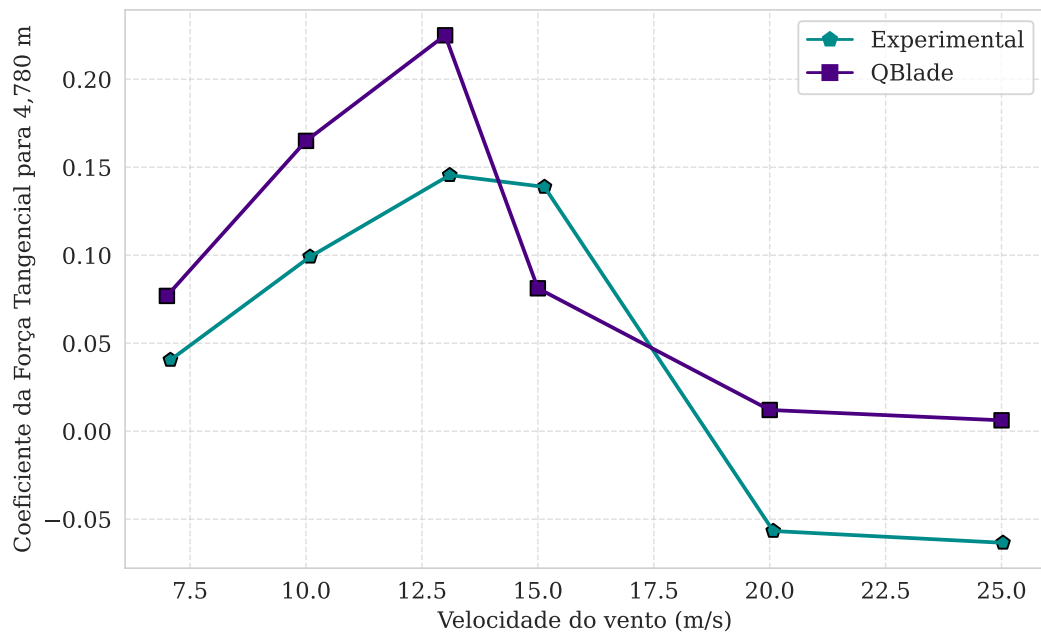
Na Figura 28, assim como observado na Figura 25, pontos maiores que os experimentais demonstram possíveis necessidades de melhorias na correção de perda da ponta. Além disso, nota-se a tendência parecida entre as duas curvas, mas com diferenças significativas em mudança no sentido, indicando maior sensibilidade desse coeficiente.

Figura 27 – Coeficiente de força tangencial no raio de 3,172 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 – Coeficiente de força tangencial no raio de 4,780 m.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, assim como mostrado por Simms *et al.* (2001), os resultados obtidos pelo Qblade se assemelham a simulações de diferentes modeladores desse problema com o método BEMT. A primeira semelhança diz respeito ao elemento encontrado a 1,510 metros da pá; tal como outros pesquisadores, os valores, especialmente do coeficiente de força normal, foram subestimados, sendo possível notar, sobretudo em velocidades maiores, a grande diferença em relação ao experimento. Segundo o mesmo autor, esses erros ocorrem devido à falta da

predição dos efeitos de atraso de estol e os efeitos 3-D por parte da simulação.

Já a segunda semelhança corresponde ao componente a 3,172 metros da pá. Prosseguindo com os resultados mostrados por Simms *et al.* (2001), também houve diferenças entre os estudiosos no teste numérico a respeito dos valores encontrados, o que é algo não esperado, já que, conforme o autor, essa região não é afetada por efeitos diferentes do comportamento 2-D.

E na parte a 4,780 metros, em relação a outros autores também é possível notar que os coeficientes foram supervalorizados. Isso indica que a correção de ponta, efeito predominante na parte final da pá, ainda precisa de correções (SIMMS *et al.*, 2001).

5.3 Avaliação do experimento da turbina pequena no QBlade

Em contraste com os cenários de alta velocidade discutidos anteriormente, a Figura 29 e a Figura 30 revelam uma tendência marcante: em regimes operacionais de velocidade reduzida, o método BEMT demonstra uma precisão notável na predição de parâmetros aerodinâmicos.

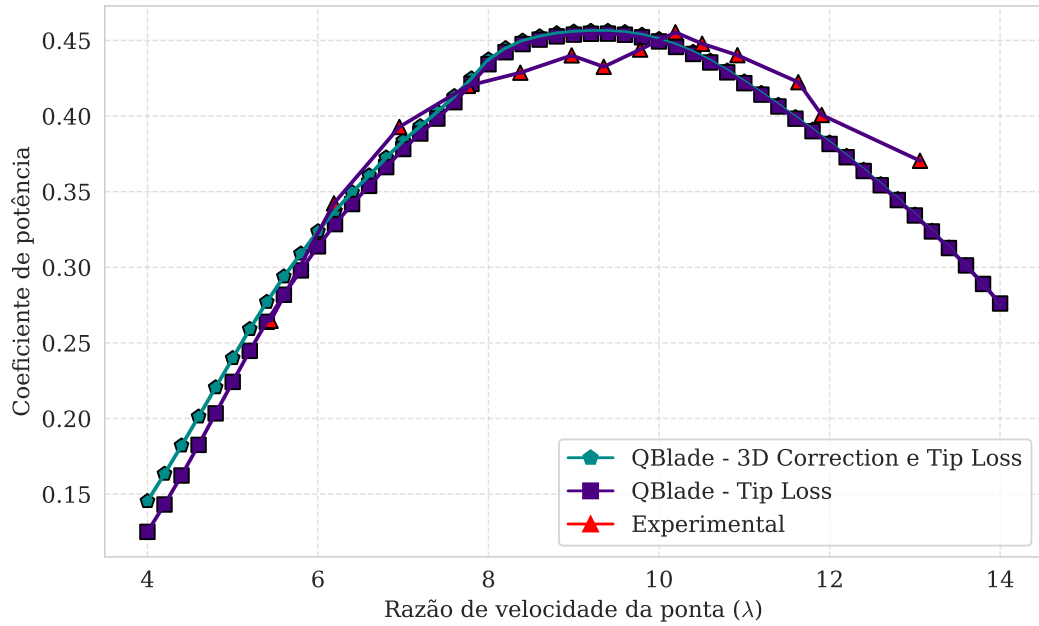
Assim como explicitado anteriormente, foram testadas duas configurações distintas: a correção *tip loss*, ou perda de ponta, e outra com esse mesmo ajuste com arranjo para incorporar os efeitos tridimensionais. Essa estrutura teve a função de examinar o efeito provocado e se seria significativo no sentido de previsão do desempenho da turbina.

Primeiramente, na Figura 29, há três curvas: vermelha, do experimento de Anderson *et al.* (1982), e as duas composições explanadas previamente, sendo notável a precisão do software em descrever o comportamento em ambas as configurações adotadas. Ademais, quando comparados entre si, o desempenho desses dois arranjos praticados nesse trabalho foi notado diferenças insignificantes, mostrando que, no estado em que é encontrada a pá, os efeitos tridimensionais não se tornaram relevantes.

De mesma forma, a Figura 30 mostrou a pequena alteração entre as duas estruturas de simulação e, revelou uma subestimação do programa em relação ao coeficiente de empuxo do rotor estudado. Esse resultado assemelhou-se ao de Wood (2011), mas apresentou uma pequena melhora quando adicionado o efeito tridimensional do atraso de estol.

Assim, usando apenas dados estimados pelo XFOIL, foi possível atingir um ótimo resultado. Entretanto, é interessante para um projeto final usar ferramentas mais avançadas, visto que ainda há diferenças a depender das configurações empregadas, como Wood (2011) explicita a falta de generalidade dessa subestimação dos valores, tal qual a supervalorização por Shen *et*

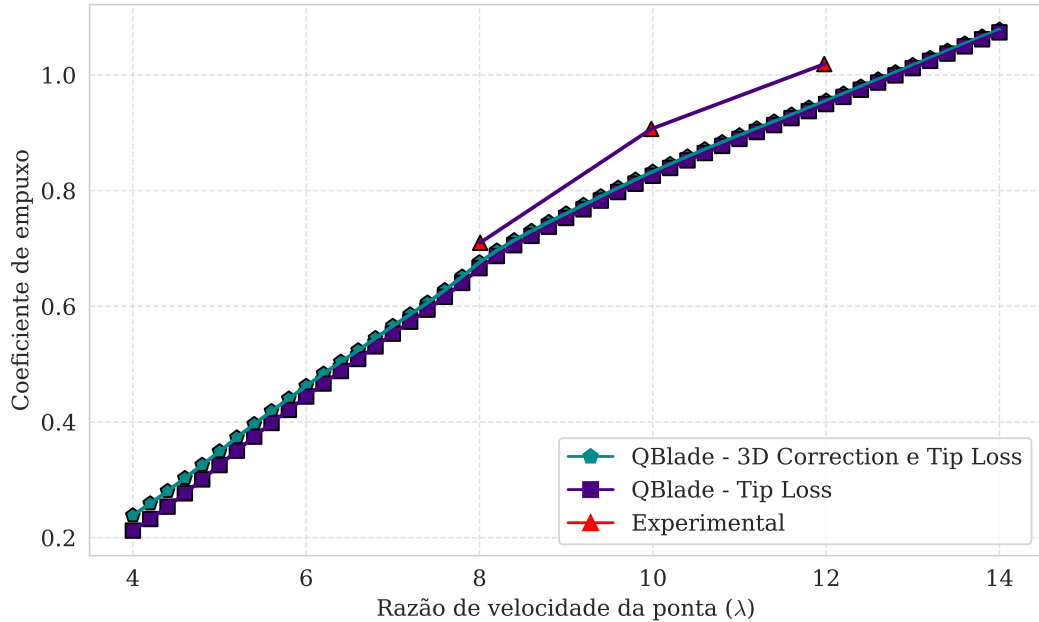
Figura 29 – Coeficiente de potência entre o QBlade e experimento da pequena pá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

al. (2005).

Figura 30 – Coeficiente de empuxo entre o QBlade e experimento da pequena pá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Para terminar, neste capítulo serão dispostas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusão

No primeiro experimento examinado, o NREL Phase VI, foram evidenciados desafios significativos do emprego do método BEMT, especialmente em condições de vento mais fortes. Em tais, a discrepância se viu elevada entre os dados experimentais e os desse estudo. Isso, como explicitado, deve-se à separação de fluxo e efeitos tridimensionais, os quais não são inerentes ao modelo, sendo necessário o emprego de equações adicionais para contornar erros que a sua formulação clássica apresenta.

Contudo, no segundo caso, turbina de pequeno porte, resultados satisfatórios foram alcançados na simulação. Também, foi notada uma pequena diferença entre a correção de ponta da pá isolada e essa quando acrescida com o efeito tridimensional - indicando a sua inexigibilidade em condições com vento mais fraco. Dessa forma, as condições foram favoráveis ao modelo BEMT, sendo possível alinhar-se à realidade física de forma mais eficaz.

Por fim, o estudo destacou as dificuldades ainda atuais do método. Dessas, pode-se citar a falta de generalidade de modelos em captar o aumento significativo do coeficiente de sustentação e o de arrasto, que, como visto, causa a superestimação do coeficiente de força normal e a subestimação do de força tangencial em cargas de vento elevado. Entretanto, em situações de vento mais leves, o BEMT apresentou-se uma ferramenta com ótimo benefício, em virtude da sua capacidade de assimilar melhor a física e valores próximos dos experimentais. Portanto, o QBlade mostrou-se útil em projetos iniciais de turbinas, reduzindo a necessidade de recursos computacionais robustos, mas que ainda precisa de melhorias e generalização.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para explorar mais o tema estudado nesse trabalho, abaixo seguem-se sugestões de trabalhos futuros:

- a) Usar outros métodos de correção, adaptando o código fonte do QBlade ou programando em uma linguagem de programação, tais como Python e Matlab.
- b) Usar outro algoritmo de solução com maior rapidez e maiores casos de convergência, tais

como de Ning (2014).

- c) Estudar polares criadas a partir de um CFD para os dois experimentos.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Dados ABEEólica**. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 20 de dezembro de 2024.
- Airfoil Tools. **Airfoils plotter (s809-nr)**. 2025. Disponível em: <http://www.airfoiltools.com/plotter/index>, Acesso em: 04 de março de 2025.
- ALMEIDA, M. S. d. **Implementação computacional para desenvolvimento de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.
- ANDERSON, M.; MILBORROW, D.; ROSS, J. Performance and wake measurements on a 3 m diameter horizontal axis wind turbine. comparison of theory, wind tunnel and field test data. In: **Int. Symp. Wind Energy Syst., Proc.:(United Kingdom)**. [S. l.: s. n.], 1982. v. 2.
- BELFKIRA, Z.; MOUNIR, H.; MARJANI, A. E. Comparison of experimental and numerical performances of a wind turbine airfoil using xfoil and computational fluid dynamics simulation. **International Review on Modelling and Simulations**, v. 12, n. 4, p. 212–221, 2019.
- BOŠNJAKOVIĆ, M.; KATINIĆ, M.; SANTA, R.; MARIĆ, D. Wind turbine technology trends. **Applied Sciences**, MDPI, v. 12, n. 17, p. 8653, 2022.
- BRANLARD, E. **Wind turbine aerodynamics and vorticity-based methods: Fundamentals and recent applications**. [S. l.]: Springer, 2017.
- BRETON, S.-P.; COTON, F. N.; MOE, G. A study on rotational effects and different stall delay models using a prescribed wake vortex scheme and nrel phase vi experiment data. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, Wiley Online Library, v. 11, n. 5, p. 459–482, 2008.
- BUHL, M. L. **New empirical relationship between thrust coefficient and induction factor for the turbulent windmill state**. [S. l.], 2005.
- BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. **Wind energy handbook**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2021.
- CHAVIAROPOULOS, P.; HANSEN, M. O. Investigating three-dimensional and rotational effects on wind turbine blades by means of a quasi-3d navier-stokes solver. **J. Fluids Eng.**, v. 122, n. 2, p. 330–336, 2000.
- CORRIGAN, J. J.; SCHILLINGS, J. J. Empirical model for stall delay due to rotation. In: **American Helicopter Society Aeromechanics Specialists Conference, San Francisco, CA**. [S. l.: s. n.], 1994. v. 21.
- DEJENE, G.; ANCHA, V. R.; BEKELE, A. Nrel phase vi wind turbine blade tip with s809 airfoil profile winglet design and performance analysis using computational fluid dynamics. **Cogent Engineering**, Taylor & Francis, v. 11, n. 1, p. 2293562, 2024.
- DESHMUKH, M. K. G.; SAMEERODDIN, M.; ABDUL, D.; SATTAR, M. A. Renewable energy in the 21st century: A review. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 80, p. 1756–1759, 2023.

- DRELA, M. Xfoil: An analysis and design system for low reynolds number airfoils. In: SPRINGER. **Low Reynolds Number Aerodynamics: Proceedings of the Conference Notre Dame, Indiana, USA, 5–7 June 1989**. [S. l.], 1989. p. 1–12.
- DRELA, M.; GILES, M. B. Viscous-inviscid analysis of transonic and low reynolds number airfoils. **AIAA journal**, v. 25, n. 10, p. 1347–1355, 1987.
- DUMITRESCU, H.; FRUNZULICĂ, F.; CARDOȘ, V. Improved stall-delay model for horizontal-axis wind turbines. **Journal of aircraft**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 50, n. 1, p. 315–319, 2013.
- FOUEST, S. L.; DEPARDAY, J.; MULLENNERS, K. The dynamics and timescales of static stall. **Journal of Fluids and Structures**, Elsevier, v. 104, p. 103304, 2021.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos**. [S. l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- FTHENAKIS, V. M.; BHATTACHARYA, S.; LYNN, P. A. **Onshore and Offshore Wind Energy: Evolution, Grid Integration, and Impact**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2024.
- HAMLAOUI, M. N.; SMAILI, A.; FELLOUAH, H. Improved bem method for hawt performance predictions. In: IEEE. **2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA)**. [S. l.], 2018. p. 1–6.
- HAND, M. M.; SIMMS, D.; FINGERSH, L.; JAGER, D.; COTRELL, J.; SCHRECK, S.; LARWOOD, S. **Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns**. [S. l.], 2001.
- HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. [S. l.]: Earthscan, 2008.
- HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- HAU, E.; RENOUARD, H. **Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics**. [S. l.]: Springer, 2006. v. 2.
- ISLAM, M. R.; BASHAR, L. B.; RAFI, N. S. Design and simulation of a small wind turbine blade with qblade and validation with matlab. In: IEEE. **2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)**. [S. l.], 2019. p. 1–6.
- JÚNIOR, F. E. d. A. M. **Avaliação das condições de operação das pás de uma turbina eólica em escala: aplicação da DFA combinada com técnicas de reconhecimento de padrões dos sinais de vibração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2017.
- KABIR, I. F. S. A.; GAJENDRAN, M. K.; NG, E.; MEHDIZADEH, A.; BERROUK, A. S. Novel machine-learning-based stall delay correction model for improving blade element momentum analysis in wind turbine performance prediction. **Wind**, MDPI, v. 2, n. 4, p. 636–658, 2022.
- KARBASIAN, H. R.; ESFAHANI, J. A.; ALIYU, A. M.; KIM, K. C. Numerical analysis of wind turbines blade in deep dynamic stall. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 197, p. 1094–1105, 2022.

LETCHER, T. **Wind energy engineering: a handbook for onshore and offshore wind turbines**. [S. l.]: Elsevier, 2023.

LINDENBURG, C. Investigation into rotor blade aerodynamics. **ECN, Peten**, 2003.

MACNEILL, R.; VERSTRAETE, D. Blade element momentum theory extended to model low reynolds number propeller performance. **The Aeronautical Journal**, Cambridge University Press, v. 121, n. 1240, p. 835–857, 2017.

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.

MANWELL, J.; MCGOWAN, J.; ROGERS, A. **Wind Energy Explained**. [S. l.]: Wiley, 2009.

MANWELL, J. F.; BRANLARD, E.; MCGOWAN, J. G.; RAM, B. **Wind Energy Explained: On Land and Offshore**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2024.

MARTEN, D.; SAVERIN, J.; LUNA, R. Behrens de; PEREZ-BECKER, S. Qblade documentation. **QBlade Documentation-QBlade Documentation**, v. 2, n. 4, 2021.

MARTEN, D.; WENDLER, J.; PECHLIVANOGLU, G.; NAYERI, C. N.; PASCHEREIT, C. O. Qblade: An open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. Special Issue 3: ICERTSD 2013, p. 264–269, February 2013.

MARTINEZ, J.; BERNABINI, L.; PROBST, O.; RODRIGUEZ, C. An improved bem model for the power curve prediction of stall-regulated wind turbines. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, Wiley Online Library, v. 8, n. 4, p. 385–402, 2005.

NAKAHARA, R. P. **Estudo aerodinâmico das pás de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte utilizando o software QBlade**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. 2021.

NING, S. A. A simple solution method for the blade element momentum equations with guaranteed convergence. **Wind Energy**, Wiley Online Library, v. 17, n. 9, p. 1327–1345, 2014.

OLIVEIRA, H. A. *et al.* **Otimização de desempenho de turbina tipo hélice de eixo horizontal em função de uma modelagem integrada e de estratégia híbrida de MPPT**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão. 2023.

PINTO, M. de O. **Fundamentos de energia eólica**. [S. l.]: Grupo Gen-LTC, 2013.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica**. [S. l.]: Cengage learning, 2013.

SHEN, W. Z.; MIKKELSEN, R.; SØRENSEN, J. N.; BAK, C. Tip loss corrections for wind turbine computations. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, Wiley Online Library, v. 8, n. 4, p. 457–475, 2005.

SILVEIRA, E. P. **Simulação computacional de um perfil aerodinâmico em escoamentos de baixo número de reynolds utilizando métodos numéricos distintos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Campus Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas. 2023.

SIMMS, D.; SCHRECK, S.; HAND, M.; FINGERSH, L. J. **NREL unsteady aerodynamics experiment in the NASA-Ames wind tunnel: a comparison of predictions to measurements**. [S. l.], 2001.

SNEL, H.; HOUWINK, R.; BOSSCHERS, J.; PIERS, W. J.; BUSSEL, G. J. W. V.; BRUINING, A. **Sectional prediction of s-D effects for stalled flow on rotating blades and comparison with measurements**. [S. l.], 1993.

SØRENSEN, J.; OKULOV, V.; RAMOS-GARCÍA, N. Analytical and numerical solutions to classical rotor designs. **Progress in Aerospace Sciences**, Elsevier, v. 130, p. 100793, 2022.

SUN, Z.; CHEN, J.; SHEN, W. Z.; ZHU, W. J. Improved blade element momentum theory for wind turbine aerodynamic computations. **Renewable energy**, Elsevier, v. 96, p. 824–831, 2016.

TANGLER, J. L. The nebulous art of using wind-tunnel airfoil data for predicting rotor performance. In: **Wind Energy Symposium**. [S. l.: s. n.], 2002. v. 7476, p. 190–196.

WITHERDEN, F. D.; JAMESON, A. Future directions in computational fluid dynamics. In: **23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference**. [S. l.: s. n.], 2017. p. 3791.

WOOD, D. Small wind turbines. In: **Advances in wind energy conversion technology**. [S. l.]: Springer, 2011. p. 195–211.

YU, G.; SHEN, X.; ZHU, X.; DU, Z. An insight into the separate flow and stall delay for hawt. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 36, n. 1, p. 69–76, 2011.

APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS DO AEROFÓLIO S809 - PARTE A

Ângulo de ataque (°)	Coefficiente de sustentação	Coefficiente de arrasto
-45,0	-0,7592	0,7757
-40,0	-0,7847	0,6776
-35,0	-0,7903	0,5739
-32,0	-0,7827	0,5100
-30,0	-0,7726	0,4670
-28,0	-0,7584	0,4241
-26,0	-0,7414	0,3813
-25,0	-0,7376	0,3597
-24,0	-0,7378	0,3379
-22,0	-0,7478	0,2943
-20,0	-0,7661	0,2510
-18,0	-0,7873	0,2087
-16,730	-0,8000	0,1826
-14,630	-0,7900	0,0793
-12,630	-0,7000	0,0547
-10,730	-0,6300	0,0401
-8,730	-0,5800	0,0266
-6,730	-0,6100	0,0193
-4,630	-0,4000	0,0127
-2,630	-0,1600	0,0090
-1,040	0,0151	0,00853
-0,010	0,1340	0,00845
1,020	0,25330	0,00854
2,050	0,37240	0,00868
3,070	0,49130	0,00863
4,100	0,6101	0,00871
5,130	0,7293	0,00898
5,640	0,7870	0,0091
6,160	0,8424	0,00917
6,410	0,8681	0,00926
6,670	0,8825	0,01019
6,920	0,8921	0,01142
7,180	0,9025	0,01256
8,200	0,9441	0,01684
9,210	0,9728	0,021455
9,570	0,96524	0,0231
10,200	0,952	0,026307
10,670	0,94972	0,0287
11,210	0,9471	0,033074
11,670	0,97393	0,0368
12,230	1,0066	0,046116
12,770	1,02007	0,0551
13,220	1,0313	0,0616
13,670	1,04168	0,0681
14,230	1,0546	0,069444
14,670	1,05782	0,0705
15,230	1,0615	0,0803
15,670	1,05301	0,088
16,200	1,043	0,096965

Fonte: Adaptado de Lindenburg (2003).

APÊNDICE B – DADOS EXPERIMENTAIS DO AEROFÓLIO S809 - PARTE B

Ângulo de ataque (°)	Coefficiente de sustentação	Coefficiente de arrasto
16,670	1,01361	0,1043
17,200	0,979	0,120907
17,570	0,9	0,1325
18,190	0,83236	0,197262
18,670	0,78	0,2474
20,0	0,7736	0,2695
22,0	0,7622	0,3042
24,0	0,7520	0,3406
25,0	0,7486	0,3596
26,0	0,7470	0,3791
28,0	0,7512	0,4197
30,0	0,7643	0,4621
32,0	0,7743	0,5045
35,0	0,7818	0,5678
40,0	0,7764	0,6704
45,0	0,7511	0,7675
50,0	0,7089	0,8573
55,0	0,6524	0,9383
60,0	0,584	1,0097
70,0	0,4201	1,1214
80,0	0,2326	1,1895
90,0	0,0341	1,2136

Fonte: Adaptado de Lindenburg (2003).

APÊNDICE C – COORDENADAS DO AEROFÓLIO S809 - PARTE A

X (mm)	Y (mm)
1000	0
996,203	0,487
985,19	2,373
967,844	5,96
945,073	11,024
917,488	17,033
885,293	23,458
848,455	30,28
807,47	37,766
763,042	45,974
715,952	54,872
667,064	64,353
617,331	74,214
567,83	84,095
519,832	93,268
474,243	99,392
428,461	101,76
382,612	101,84
292,97	96,703
250,247	91,908
209,576	85,851
171,409	78,687
136,174	70,58
104,263	61,697
76,035	52,224
51,823	42,352
31,91	32,299
16,59	22,29
6,026	12,615
0,658	3,723
0,204	1,942
0	-0,02
0,213	-1,794
1,045	-3,477
1,208	-3,724
2,398	-5,266
9,313	-11,499
23,23	-20,399
42,32	-30,269
65,877	-40,821
93,426	-51,923
124,111	-63,082
157,653	-73,73
193,738	-83,567
231,914	-92,442
271,438	-99,905
311,968	-105,281
353,37	-108,181
395,329	-108,011
438,273	-104,552
481,92	-97,347

Fonte: Airfoil Tools (2025).

APÊNDICE D – COORDENADAS DO AEROFÓLIO S809 - PARTE B

X (mm)	Y (mm)
527,928	-86,571
576,211	-73,979
626,092	-60,644
676,744	-47,441
727,211	-35,1
776,432	-24,204
823,285	-15,163
866,63	-8,204
905,365	-3,363
938,474	-0,487
965,086	0,743
984,478	0,775
996,141	0,29
1000	0

Fonte: Airfoil Tools (2025).