



OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA DE AEROFÓLIOS DE TURBINAS EÓLICAS
DE EIXO HORIZONTAL PARA MELHORIA DO
DESEMPENHO AERODINÂMICO

João Victor Barros dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica, COPPE, da Universidade Federal
do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Gustavo Cesar Rachid Bodstein

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA DE AEROFÓLIOS DE TURBINAS EÓLICAS
DE EIXO HORIZONTAL PARA MELHORIA DO
DESEMPENHO AERODINÂMICO

João Victor Barros dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientador: Gustavo Cesar Rachid Bodstein

Aprovada por: Prof. Marcelo José Colaço
Prof. Su Jian

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2024

Barros dos Santos, João Victor

Otimização Híbrida de Aerofólios de Turbinas Eólicas
de Eixo Horizontal para Melhoria do
Desempenho Aerodinâmico/João Victor Barros dos Santos.
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVII, 93 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Gustavo Cesar Rachid Bodstein

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Mecânica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 89 – 93.

1. Otimização Híbrida. 2. Energia Eólica.
3. Aerofólios. I. Rachid Bodstein, Gustavo Cesar.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

*A todos que fizeram parte
desta jornada.*

Agradecimentos

Esta dissertação representa não apenas o fim de uma etapa acadêmica, mas também o resultado de uma jornada que só foi possível graças ao apoio e amor de muitas pessoas especiais.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Wanderlei Alcântara e Sonia Marta Barros, que me proporcionaram a oportunidade de estudar e crescer. Seu amor incondicional e apoio constante foram fundamentais para que eu superasse os desafios ao longo da minha trajetória. À minha irmã, Bruna Barros, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e acreditando em mim, tornando-se uma presença essencial em todos os momentos dessa caminhada. À minha esposa, Íris Silvério, minha parceira de vida, que foi meu alicerce, minha maior incentivadora e a responsável por me ajudar a manter o foco e a força para seguir em frente, compartilhando comigo cada conquista alcançada.

Sou imensamente grato aos meus avós, Vanderlei Alcântara, Suely Santos, Marina Ferreira e João Francisco Barros, que sempre me ofereceram carinho, orações e ensinamentos que moldaram quem sou hoje. Agradeço também à Suzanne Garcia, que teve um papel essencial nos primeiros passos do mestrado. Sua amizade e as conversas repletas de risadas trouxeram leveza ao período de tantas mudanças e incertezas. Aos meus amigos e primos, que, em meio às turbulências dessa jornada, me proporcionaram momentos de descontração e equilíbrio, tornando todo o processo mais suportável e significativo. A Guilherme Campos, cuja orientação, conselhos e apoio foram fundamentais ao longo dessa trajetória, agradeço pelas palavras de incentivo que me ajudaram a tomar decisões importantes e a me manter focado nos objetivos.

Por fim, um agradecimento especial aos meus colegas de mestrado, pela troca de conhecimento, pelo apoio mútuo e pelos momentos compartilhados. Foi um privilégio caminhar ao lado de pessoas tão dedicadas e inspiradoras, e tenho a certeza de que continuaremos crescendo juntos, enfrentando novos desafios no doutorado.

A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento. Sem o apoio, o amor e a confiança de cada um, nada disso seria possível.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO HÍBRIDA DE AEROFÓLIOS DE TURBINAS EÓLICAS
DE EIXO HORIZONTAL PARA MELHORIA DO
DESEMPENHO AERODINÂMICO

João Victor Barros dos Santos

Dezembro/2024

Orientador: Gustavo Cesar Rachid Bodstein

Programa: Engenharia Mecânica

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a redução da dependência de fontes fósseis têm impulsionado o crescimento da energia eólica como alternativa sustentável. Para tornar essa fonte ainda mais eficiente, a otimização de turbinas eólicas de eixo horizontal, amplamente utilizadas em instalações *onshore* e *offshore*, é fundamental. Esta dissertação propõe uma metodologia híbrida de otimização aerodinâmica para aerofólios de turbinas *offshore*, combinando os algoritmos de Enxame de Partículas e Evolução Diferenciada. Essa abordagem equilibra precisão e eficiência computacional, com parâmetros ajustados com base em estudos prévios e análise extensiva. A Teoria do Momento do Elemento de Pá foi utilizada para validar os modelos, permitindo a análise detalhada de coeficientes de potência e torque em diferentes condições operacionais. O algoritmo foi validado frente a dados da literatura, assegurando a precisão dos resultados e possibilitando comparações entre diferentes configurações geométricas para maximizar a eficiência energética. Apesar de limitações como a ausência de dados experimentais, os resultados obtidos oferecem contribuições relevantes para a otimização de aerofólios e apontam caminhos para pesquisas futuras. Com essa abordagem, foi possível projetar aerofólios que equilibram desempenho otimizado e viabilidade construtiva, contribuindo para o desenvolvimento de turbinas mais eficientes e alinhadas às demandas de um mercado em expansão e à necessidade de mitigar mudanças climáticas. Este estudo apresenta avanços metodológicos e pode servir como base sólida para futuras investigações em energia renovável e otimização aerodinâmica.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HYBRID OPTIMIZATION OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE AIRFOILS FOR ENHANCED AERODYNAMIC PERFORMANCE

João Victor Barros dos Santos

December/2024

Advisor: Gustavo Cesar Rachid Bodstein

Department: Mechanical Engineering

The growing concern about climate change and the need to reduce dependence on fossil fuels have driven the expansion of wind energy as a sustainable alternative. To enhance its efficiency, the optimization of horizontal-axis wind turbines, widely used in both onshore and offshore installations, is crucial. This dissertation proposes a hybrid aerodynamic optimization methodology for offshore turbine airfoils, combining the Particle Swarm Optimization and Differential Evolution algorithms. This approach balances computational efficiency and precision, with parameters refined based on prior studies and extensive analysis. The Blade Element Momentum Theory was employed to validate the models, enabling a detailed assessment of power and torque coefficients under various operational conditions. The algorithm was benchmarked against data from the literature, ensuring result accuracy and allowing comparisons between different geometric configurations to maximize energy efficiency. Despite limitations such as the absence of experimental data, the results contribute significantly to airfoil optimization and offer directions for future research. This methodology enabled the design of airfoils that achieve an optimized balance between performance and constructive feasibility, aiding the development of more efficient turbines aligned with the demands of an expanding market and the urgency of mitigating climate change. This study presents methodological advances and provides a robust foundation for future investigations in renewable energy and aerodynamic optimization.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Problema da Pesquisa	2
1.3 Justificativa	6
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo Geral	8
1.4.2 Objetivos Específicos	8
1.5 Metodologia	8
1.6 Contribuições do Trabalho	9
1.7 Estrutura da Dissertação	10
2 Revisão Bibliográfica	11
2.1 Energia Eólica	11
2.1.1 O Recurso e o Princípio Físico	13
2.1.2 Matriz Brasileira	15
2.1.3 Comparação entre Turbinas Eólicas <i>Onshore</i> e <i>Offshore</i>	18
2.2 Fundamentos de Aerodinâmica	19
2.2.1 Conceitos Fundamentais	19
2.2.2 Forças Aerodinâmicas	19
2.2.3 Perfis Aerodinâmicos (Aerofólios)	20
2.2.4 Ângulo de Ataque	21
2.3 Algoritmo de Otimização	22
2.3.1 Evolução Diferenciada	24
2.3.2 Enxame de Partículas	25

2.3.3	Método Híbrido	27
2.3.4	Função Objetivo: XFOIL	29
2.4	Parametrização de Aerofólios	29
3	Método Proposto	32
3.1	Análise Aerodinâmica Computacional	33
3.1.1	Função Objetivo	33
3.2	Aerofólio de Referência	34
3.3	Parametrização do Aerofólio	36
3.4	População Inicial e suas Restrições	38
3.5	Algoritmo de Otimização	39
3.5.1	Metodologia Híbrida	40
3.5.2	Enxame de Partículas	41
3.5.3	Evolução Diferenciada	41
3.5.4	Análise de Convergência	42
3.5.5	Aerofólios Otimizados	43
3.5.6	Modelagem Aerogerador	43
3.5.7	Algoritmo de Desempenho	62
4	Resultados e Discussões	65
4.1	Validação do Algoritmo BEMT	65
4.1.1	Exemplo da Literatura	65
4.1.2	Turbina Eólica 5MW NREL	68
4.2	Adaptações para Função Objetivo	70
4.3	Redução de Dimensionalidade	72
4.4	Otimização do Aerofólio	73
4.4.1	Análise de Convergência	74
4.4.2	Impacto da Otimização na Eficiência Aerodinâmica	74
4.5	Otimização da Pá do Aerogerador	77
4.6	Avaliação da Performance do Aerogerador	81
5	Conclusão	86
5.1	Trabalhos Futuros	87
	Referências Bibliográficas	89

Lista de Figuras

1.1	Evolução do consumo global de energia primária por fonte (1800–2023).	2
1.2	Mudanças na temperatura superficial global (1850–2020).	3
1.3	Expansão anual da capacidade energética (2002-2022).	4
1.4	Evolução do consumo global de energia primária por fonte.	5
1.5	Projeções de capacidade instalada global de energia eólica <i>offshore</i> .	6
2.1	Desenvolvimento do tamanho das turbinas eólicas ao longo dos anos.	12
2.2	Diferentes orientações de eixo para turbinas eólicas.	13
2.3	Componentes fundamentais de uma turbina eólica de eixo horizontal moderna com sistema de engrenagens.	14
2.4	Matriz Elétrica Brasileira.	16
2.5	Evolução da Capacidade Instalada (MW).	17
2.6	Diagrama de força em um aerofólio.	20
2.7	Terminologia de um aerofólio.	21
2.8	Exemplificação de máximo/mínimo de uma função.	22
2.9	Exemplificação dos diferentes mínimos de uma função.	23
2.10	Esquemático da direção de procura.	27
2.11	Esquemático simplificado do método híbrido.	28
3.1	Fluxograma.	32
3.2	Fluxograma da função objetivo.	34
3.3	Aproximação da região a ser otimizada.	36
3.4	Aerofólios localizados na ponta da pá.	36
3.5	Exemplificação da geometria básica de um aerofólio.	37
3.6	Fluxograma do algoritmo híbrido.	40
3.7	Fluxograma do algoritmo para enxame de partículas.	41
3.8	Fluxograma do algoritmo para evolução diferenciada.	42
3.9	Tubo de corrente da extração de energia de uma turbina eólica.	44
3.10	Linhas de corrente da extração de energia de uma turbina eólica.	45
3.11	Variação de C_p e C_t com Fator de indução axial (a).	49
3.12	Trajetória de uma partícula de ar passando pelo disco do rotor.	50

3.13	Crescimento de velocidade tangencial ao longo da espessura do disco.	51
3.14	Geometria para análise do rotor.	52
3.15	Exemplificação de um elemento de pá.	56
3.16	Diagrama das forças e velocidades em um elemento de pá.	57
3.17	Fluxograma do algoritmo BEMT desenvolvido.	64
4.1	Comparação dos resultados de torque apresentados por BURTON <i>et al.</i> (2001).	67
4.2	Comparação dos resultados de C_p para o NREL 5MW.	69
4.3	Avaliação do uso da função objetivo.	71
4.4	Extrapolação do Coeficiente de Sustentação pelo método de Viterna.	72
4.5	Resultado da parametrização do aerofólio.	73
4.6	Comparativo entre a geometria dos perfis.	76
4.7	Ganho de eficiência do aerofólio otimizado em relação ao original.	76
4.8	Performance aerodinâmica do aerofólio otimizado.	77
4.9	Resultado da parametrização do DU 93W210 LM.	78
4.10	Resultado da otimização do DU 93W210 LM.	78
4.11	Ganho de eficiência do DU 93W210 LM otimizado.	79
4.12	Performance aerodinâmica do aerofólio otimizado.	79
4.13	Resultado da parametrização do DU 93W250 LM.	80
4.14	Resultado da otimização do DU 93W250 LM.	81
4.15	Ganho de eficiência do DU 93W250 LM otimizado.	81
4.16	Performance aerodinâmica do aerofólio otimizado.	82
4.17	Variação do Coeficiente de Potência pela razão de velocidade de ponta.	83
4.18	Comportamento do Coeficiente de Potência pós ajuste dos aerofólios.	84
4.19	Ganho de torque associado a nova configuração de aerofólios.	85

Lista de Tabelas

4.1	Projeto de pá de um rotor com diâmetro de 17 metros.	66
4.2	Erros encontrados para diferentes valores de Tip-Speed Ratio.	67
4.3	Distribuição da pá do aerogerador 5MW NREL.	68
4.4	Dados Turbina Eólica 5MW NREL.	68
4.5	Parâmetros utilizados no XFoil modificado.	71
4.6	Parâmetros associados ao enxame de partículas.	75
4.7	Parâmetros associado a evolução diferenciada.	75
4.8	Nova distribuição da pá do aerogerador 5MW NREL.	84

Lista de Símbolos

A_c	Área circular da turbina, p. 15
A_∞	Área de corrente livre , p. 21
A_d	Área do disco atuador, p. 21
A_w	Área da esteira, p. 21
B	Número de pás de uma turbina, p. 34
B_i	Pontos de controle da Curva de Bézier, p. 46
CR	Fator de <i>crossover</i> , p. 40
C_D	Coeficiente de arrasto, p. 34
C_L	Coeficiente de sustentação, p. 34
C_T	Coeficiente de empuxo, p. 37
C_d	Coeficiente de arrasto, p. 54
C_l	Coeficiente de sustentação, p. 54
C_n	Coeficiente de força normal, p. 34
C_p	Coeficiente de Potência, p. 15
C_t	Coeficiente de força tangencial, p. 34
$C_{p_{max}}$	Coeficiente de potência máximo, p. 24
C_t	Coeficiente de tração, p. 24
D	Força de Arrasto, p. 33
F_m	Força, p. 22
I	Momento de Inercia de um Anel, p. 29

$J_{n,i}(t)$	Polinômios de base de Bernstein, p. 46
L	Força de Sustentação, p. 33
L	Momento Angular, p. 29
M	Quantidade total de iterações, p. 55
N	Quantidade de indivíduos, p. 55
N	Quantidade de pás de uma turbina, p. 33
P	Potência, p. 15
Q	Torque, p. 29
R	Raio do rotor, p. 28
U_{axial}	velocidade axial na pá, p. 33
U_{rel}	Velocidade relativa resultante na pá, p. 33
U_{rot}	velocidade rotacional na pá, p. 33
V_2	Velocidade na região 2, p. 27
V_3	Velocidade na região 3, p. 27
Δp	Diferença de Pressão, p. 22
Ω	Velocidade angular, p. 26
α	Ângulo de ataque, p. 66
δ_1	Função delta de Dirac, p. 40
δ_2	Função delta de Dirac, p. 40
$\dot{m}$	Fluxo de massa, p. 21
η_r	Eficiência do elemento de pá, p. 30
λ	Razão de velocidade na ponta (<i>tip speed ratio</i>), p. 28
λ_r	Razão de velocidade local (<i>Local Speed Ratio</i>), p. 28
$\mathbf{P}$	Melhor lugar observado pelo indivíduo, p. 42
$\mathbf{P}_g$	Melhor lugar observado por toda a população, p. 42

$\mathbf{v}$	Direção de procura, p. 42
$\mathbf{x}$	Posição do indivíduo, p. 40
dA_d	Área infinitesimal de um anel anular, p. 28
dP	Potência infinitesimal, p. 29
dQ	Torque infinitesimal, p. 29
dr	Distância radial infinitesimal, p. 28
dT	Empuxo infinitesimal, p. 28
ω	Velocidade angular adicional, p. 27
ρ	Densidade do fluido, p. 15
σ'	Fator de solidez local, p. 35
θ	ângulo de passo (<i>Pitch</i>), p. 33
φ	Ângulo de indução, p. 34
a	Fator de indução axial, p. 23
c	Corda de um aerofólio, p. 33
c_l/c_d	Razão sustentação-arrasto (<i>lift-to-drag ratio</i>), p. 72
dC_p	Coeficiente potência infinitesimal, p. 30
dE	Empuxo infinitesimal, p. 36
dF_L	Força de arrasto infinitesimal, p. 34
dF_L	Força de sustentação infinitesimal, p. 34
dF_N	Força normal infinitesimal, p. 34
dF_T	Força tangencial infinitesimal, p. 34
f_c	Fator de correção para o cubo, p. 35
f_c	Fator de correção total, p. 36
f_p	Fator de correção para as pontas, p. 35
g	Aceleração gravitacional, p. 22

h	Altura relativa, p. 22
h_{∞}	Altura relativa a corrente livre, p. 22
h_d	Altura relativa ao disco atuador, p. 22
m	Massa, p. 29
n	Grau da Curva de Bézier, p. 46
p_2	Pressão na região 2, p. 27
p_3	Pressão na região 3, p. 27
r	Distância radial do eixo de rotação, p. 26
r_0	Raio do cubo, p. 35
v_{∞}	Velocidade de corrente livre, p. 15
a'	Fator de indução de fluxo tangencial, p. 26
A	Termo da velocidade de amplificação das perturbações, p. 66
B	Termo de estabilidade dessas perturbações, p. 66
N	Termo de amplificação crítico, p. 66
$E_{\max}$	Tolerância para critério de convergência, p. 60
U_w	Velocidade na esteira, p. 21
U_{∞}	Velocidade em livre corrente, p. 21
U_d	Velocidade no disco atuador, p. 21
p_w	Pressão na esteira, p. 21
p_{∞}	Pressão em livre corrente, p. 21
p_d^+	Pressão imediatamente antes do disco atuador, p. 21
p_d^-	Pressão imediatamente após o disco atuador, p. 21

Lista de Abreviaturas

ABEE	Associação Brasileira de Energia Eólica, p. 5
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica, p. 4
BEMT	Teoria do Momento do Elemento de Pá (<i>Blade Element Momentum Theory</i>), p. 8
CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>), p. 49
EERE	<i>Energy Efficiency and Renewable Energy</i> , p. 12
EPE	Empresa de Pesquisa Energética, p. 18
HAWT	Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>), p. 6
IEA	<i>International Energy Agency</i> , p. 3
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> , p. 2
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> , p. 2
MAE	Erro Médio Absoluto (<i>Mean Absolute Error</i>), p. 63
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio (<i>Mean Absolute Percentage Error</i>), p. 63
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> , p. 64
PSO	Otimização por Enxame de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>), p. 41
RMSE	Erro Quadrático Médio (<i>Root Mean-Square Error</i>), p. 63
RPM	Rotações por Minuto, p. 59
TSR	Razões de Velocidade na Ponta (<i>Tip-Speed Ratios</i>), p. 58
WEH	<i>Wind Energy Handbook</i> , p. 62

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização do Tema

A Revolução Industrial, marco transformador na história da humanidade, foi impulsionada pela inovação tecnológica e pela transição para uma produção industrial em larga escala. Este período trouxe consigo um aumento exponencial na demanda por energia, sendo inicialmente atendido majoritariamente por fontes fósseis, como exemplificado pela Figura 1.1. Contudo, à medida que a sociedade avançou, essa crescente dependência resultou em desafios ambientais significativos, culminando na atual crise climática. O aumento das emissões de gases de efeito estufa e a exploração desenfreada de recursos naturais impulsionaram uma reflexão global sobre a necessidade urgente de transições energéticas sustentáveis. Nesse cenário, a busca por fontes de energia renovável torna-se imperativa, visando mitigar os impactos ambientais adversos e construir um futuro mais sustentável WRIGLEY (2013); CHANG *et al.* (2021).

Diante do aumento populacional, que consome e demanda cada vez mais energia, a relação da humanidade com o planeta entra em conflito crescente. A matriz energética global é predominantemente baseada em fontes não renováveis, causando um grande impacto ambiental e contribuindo para problemas climáticos recorrentes, Figura 1.1. É importante destacar que, contrariamente ao que alguns podem acreditar, a principal causa da crise climática está vinculada à atividade humana, iniciada na Revolução Industrial na Inglaterra. Relatórios indicam que as variações de temperatura seriam significativamente menores sem essas interferências, como apresenta a Figura 1.2, que compara as projeções com e sem ação humana CHANG *et al.* (2021); IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021).

O último relatório do IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021), divulgado em 2021, projeta que o planeta experimentará um au-

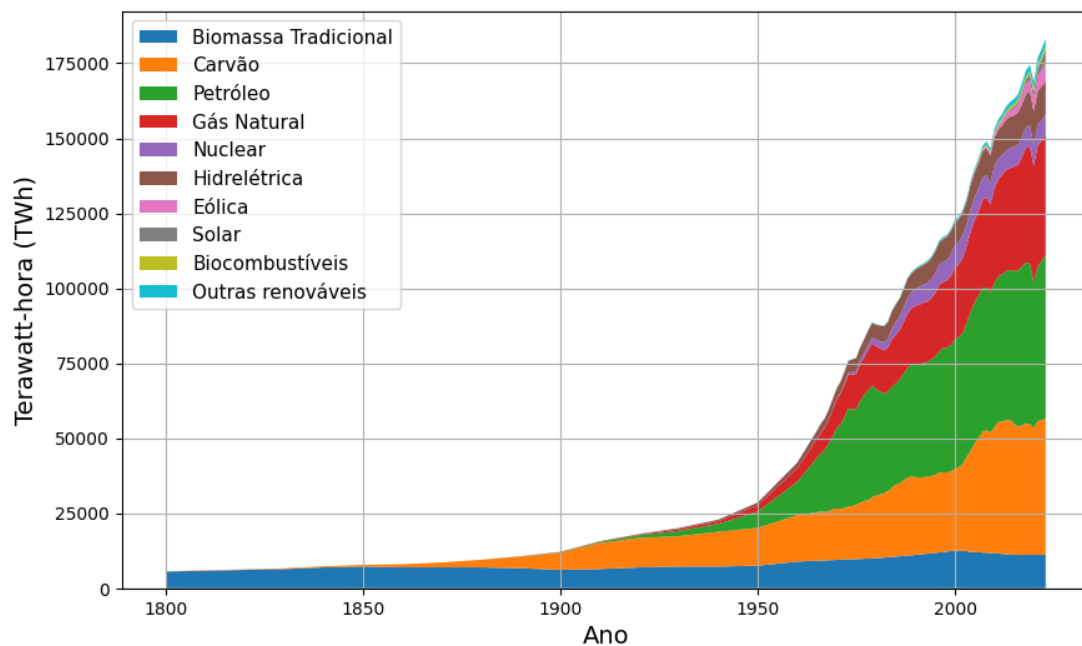


Figura 1.1: Evolução do consumo global de energia primária por fonte (1800–2023).
Fonte: Adaptador de RITCHIE *et al.* (2020)

mento de temperatura entre 1,5°C a 2°C nos próximos anos, indicando uma mudança mais acelerada do que inicialmente previsto. Esse cenário, infelizmente, já não pode ser completamente revertido, apenas mitigado por meio de uma redução substancial nas emissões de gases do efeito estufa. Essas elevadas taxas de emissão estão principalmente associadas à forma de geração de energia elétrica, tornando o setor energético responsável por uma parcela significativa das emissões globais IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2023).

Apesar das projeções indicarem cenários cada vez mais desafiadores em um futuro próximo, os efeitos do colapso climático já são perceptíveis em todo o mundo, manifestando-se por meio de mudanças extremas e alterações nos padrões climáticos. Como evidenciado, grande parte desses eventos são sintomas de ações e medidas humanas no passado, incluindo o crescimento desenfreado do uso de fontes não renováveis de energia. Diante desse cenário, o mundo iniciou uma transição em suas matrizes energéticas em direção às chamadas fontes limpas, que são caracterizadas por baixo impacto ambiental e renovabilidade.

1.2 Problema da Pesquisa

Segundo os últimos dados apresentados pela IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2023), aproximadamente 300 GW de capacidade de energias renováveis foram adicionados globalmente, representando 83% da nova

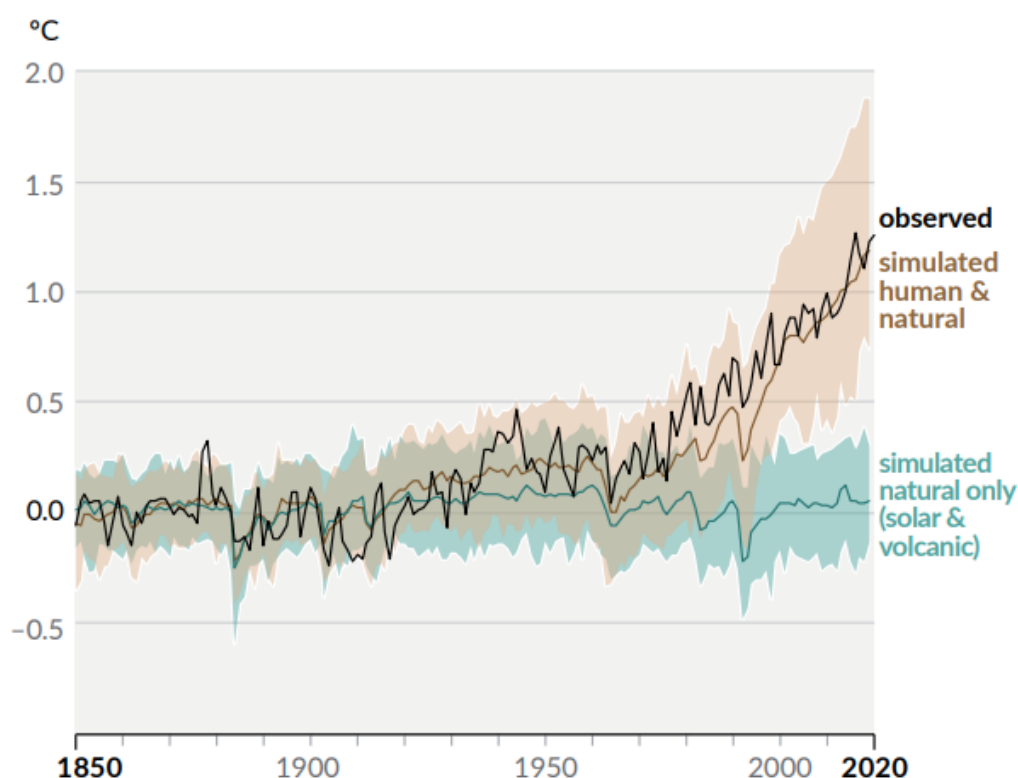


Figura 1.2: Mudanças na temperatura superficial global (1850–2020). Fonte IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021)

capacidade energética, enquanto o restante consistiu em adições de combustíveis fósseis e nucleares. A tendência destacada é ilustrada pela Figura 1.3, que revela um crescimento exponencial na expansão da capacidade energética proveniente de fontes renováveis ano após ano. Entretanto, em vista das demandas climáticas futuras, é imperativo que tanto o volume quanto a participação das energias renováveis deverão crescer de maneira mais significativa IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2023).

Segundo dados do IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021), apesar do crescimento das fontes de energia renovável nas últimas décadas, a matriz energética global ainda é dominada por fontes não limpas, como combustíveis fósseis. A imagem apresentada na Figura 1.4 evidencia que, entre 1971 e 2019, não houve mudança significativa na distribuição de fontes energéticas. Embora tenha havido algum avanço na participação de energias renováveis, o petróleo, o gás natural e o carvão continuam a desempenhar um papel predominante. Isso ressalta a urgência em intensificar os esforços para uma transição energética mais sustentável e reduzir a dependência de fontes poluentes.

Diferentemente do padrão mundial, o Brasil exibe uma matriz energética mais alinhada com as demandas atuais, com mais de 50% de sua capacidade energética oriunda de hidrelétricas, uma fonte limpa e de baixo impacto ambiental. No entanto,

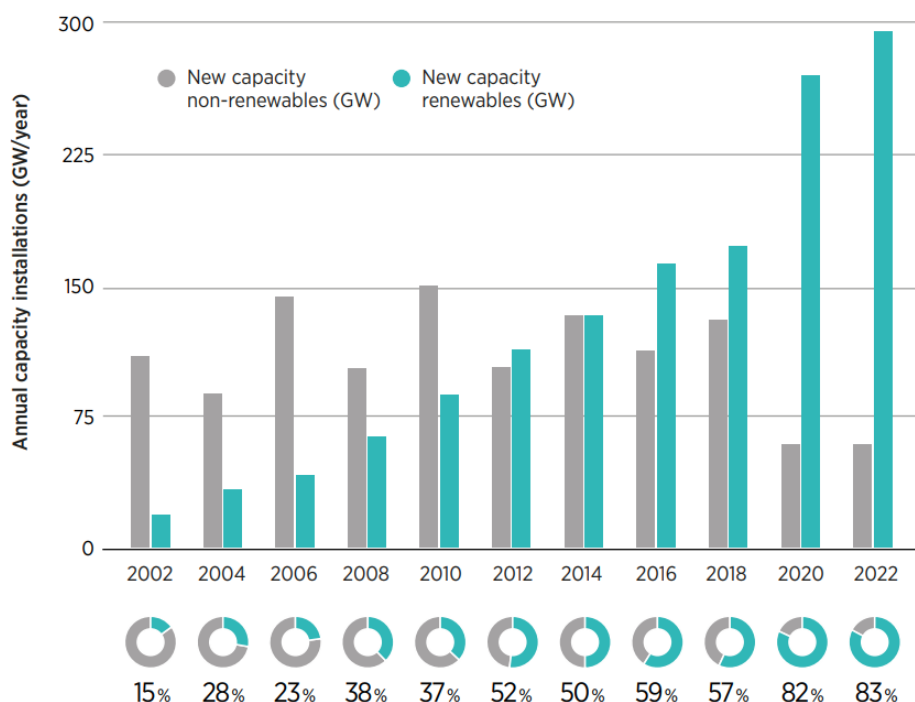


Figura 1.3: Expansão anual da capacidade energética (2002-2022). Fonte IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2023)

ainda mantém uma parcela considerável de aproximadamente 24% proveniente de termelétricas, além de uma participação relativamente baixa de outras fontes alternativas na composição de sua produção ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2023).

Diante dos dados expostos, torna-se evidente que o Brasil é altamente dependente de hidrelétricas para sua geração elétrica, o que recentemente se revelou como um desafio para o país. A escassez de chuvas, a reduzida capacidade nos reservatórios e a falta de um planejamento estratégico eficiente para o setor elétrico brasileiro são alguns dos fatores que contribuíram para a crise energética. A principal resposta foi aumentar a produção por meio das termoeletricas, as quais, além de intensificarem o impacto ambiental durante esse período, resultaram em custos mais elevados para o consumidor final JUNIOR *et al.* (2023); HUNT *et al.* (2018); BORGES (2021).

A dependência de um único meio de produção evidenciou desafios e ressaltou a urgência de implementar mudanças. O cenário hidrológico crítico destacou a importância de diversificar a matriz energética e explorar fontes alternativas, como a energia eólica e fotovoltaica. Apesar de serem fontes abundantes no território nacional, essas opções ainda carecem de exploração e incentivos significativos JUNIOR *et al.* (2023); HUNT *et al.* (2018).

Até o momento, a estratégia adotada pelo Brasil envolve a expansão de parques eólicos, os quais atualmente compõem 14% da capacidade instalada. Esses parques estão predominantemente localizados nas regiões sudeste e nordeste do país, sendo

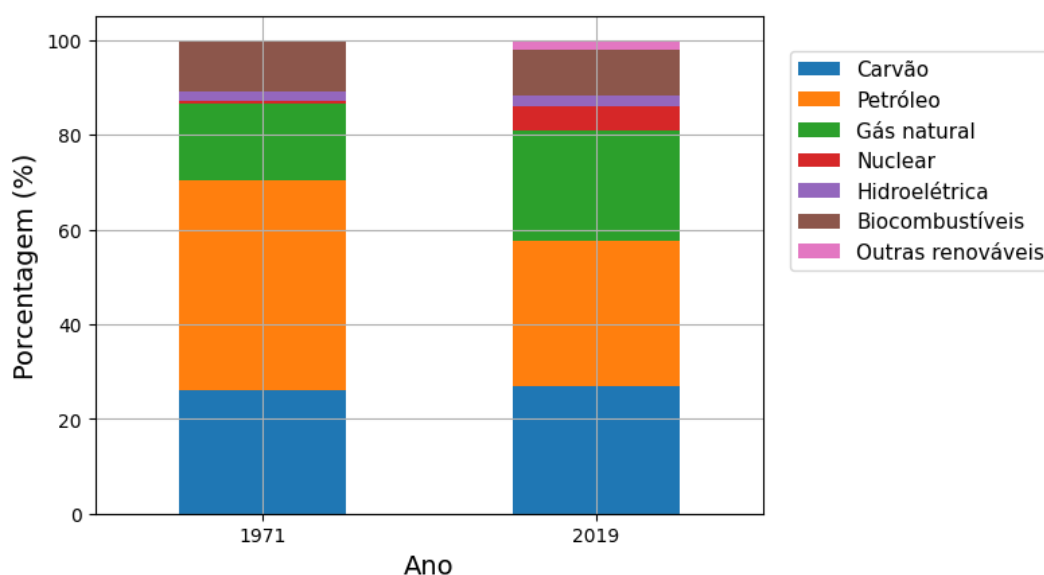


Figura 1.4: Evolução do consumo global de energia primária por fonte. Fonte: Adaptado de IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021)

todos instalados em terra, conhecidos como *onshore*. Embora represente uma fonte que o país possa explorar mais profundamente, a energia eólica já enfrenta alguns desafios e problemas. Dificuldades na construção e operação das instalações, a intermitência do regime eólico, o impacto do ruído, a interferência das torres eólicas no clima e a escassez de recursos de pesquisa são algumas das desvantagens que impedem o Brasil de aproveitar totalmente o potencial da energia eólica SAMPAIO e BATISTA (2021); DE LIMA CAMARGO *et al.*.

Considerando essa situação, há projetos em andamento que buscam implementar novas usinas eólicas, mas em alto mar, conhecidas como usinas *offshore*. Além de apresentarem menor impacto ambiental e social, essas usinas têm fatores de capacidade mais elevados, melhorando o rendimento, o que vem despertando o interesse de diversos países.

De acordo com dados da ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2024), o Brasil também possui um potencial considerável nessa modalidade, justificando sua exploração e alinhando-se a tendência mundial que impulsiona o desenvolvimento tecnológico. Embora essa abordagem tenha sido explorada apenas recentemente, já apresenta projeções significativas, como evidenciado na Figura 1.5, sendo adotada principalmente por países europeus e a China ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2024, 2023).

A transição global para uma matriz energética mais limpa e renovável ganhou força nos últimos anos. No entanto, esse movimento tardio resultou em um atraso significativo na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias associadas às energias renováveis, criando uma disparidade entre a eficiência das fontes renováveis e não

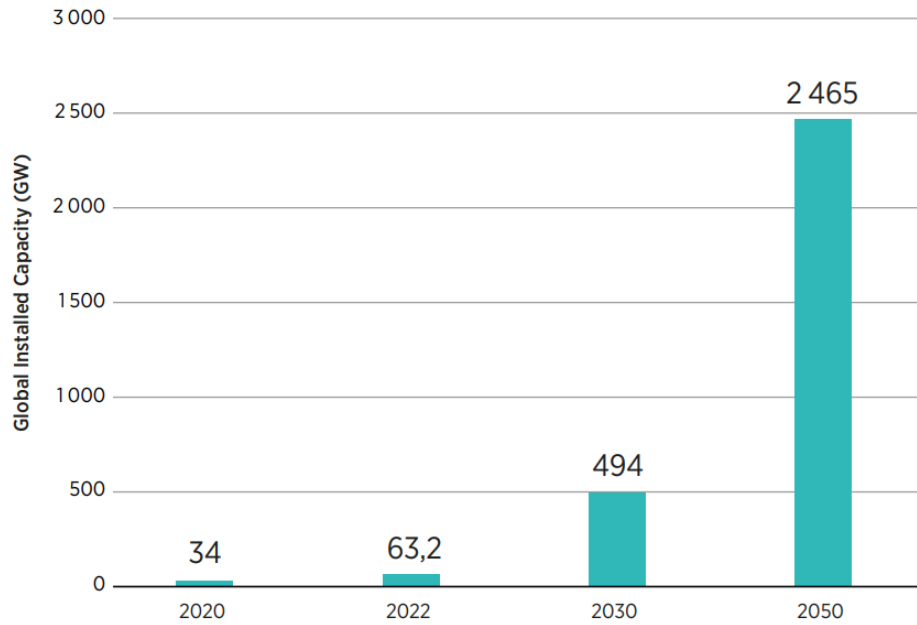


Figura 1.5: Projeções de capacidade instalada global de energia eólica *offshore*. Fonte IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2023)

renováveis. Diante desse cenário, este trabalho visa contribuir para o seu desenvolvimento no Brasil, auxiliando na expansão da matriz energética e mitigando crises energéticas futuras DE FREITAS CAVALCANTI *et al.* (2023).

A busca por aprimorar o desempenho na geração de energia vai além da migração para fontes renováveis. Há um esforço global contínuo para otimizar o processo como um todo, abrangendo melhorias no design e a implementação de novas metodologias. Neste contexto, esta dissertação foca na otimização geométrica de aerofólios utilizados nas pás dos aerogeradores, uma área de grande relevância para a eficiência energética, visando aumentar a eficiência das turbinas eólicas de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine* - HAWT).

1.3 Justificativa

Historicamente, as energias limpas foram subexploradas, o que retardou o desenvolvimento tecnológico no setor. No entanto, as crises energéticas e o agravamento das mudanças climáticas trouxeram essas fontes de volta ao centro das discussões. Dada a crescente demanda por soluções energéticas mais sustentáveis, a pesquisa sobre turbinas eólicas *offshore* se torna extremamente relevante. O projeto busca contribuir significativamente para esse cenário, explorando novas soluções que podem aumentar a eficiência e a viabilidade das HAWTs, longe da costa. Ao impulsionar a eficiência energética, espera-se que as turbinas *offshore* desempenhem um papel crucial na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Neste trabalho deseja-se propor uma metodologia de otimização de aerofólios de modo a aumentar a eficiência de turbinas HAWT. Entre os trabalhos da literatura analisados, destacam-se as pesquisas de RIBEIRO *et al.* (2012) e HANSEN (2018), cujas metodologias guardam semelhanças com a abordagem adotada nesta dissertação. Ambos os estudos ressaltam a importância da parametrização precisa do aerofólio e da análise da função objetivo. As modificações propostas por HANSEN (2018) no software XFOIL foram incorporadas ao presente trabalho, ampliando as capacidades analíticas e permitindo uma avaliação aerodinâmica mais robusta e precisa. Essas referências fornecem uma base sólida para o desenvolvimento da metodologia de otimização adotada.

Os resultados dos estudos avaliados indicam que a otimização geométrica dos aerofólios contribui diretamente para o aumento da eficiência aerodinâmica, que é crucial para maximizar a produção de energia. A eficiência aerodinâmica se refere à capacidade de um aerofólio de converter energia do vento em força propulsora, maximizando a força de sustentação e minimizando a força de arrasto. Neste trabalho, essa otimização é fundamental para melhorar o desempenho das turbinas *offshore*.

As turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT) instaladas em ambientes *offshore* apresentam diferenças significativas em relação às suas contrapartes *onshore*, devido às distintas condições operacionais. Turbinas *onshore* geralmente enfrentam ventos mais variáveis e menor densidade energética, enquanto turbinas *offshore* são projetadas para aproveitar ventos mais fortes e consistentes, resultando em maior capacidade de produção de energia e eficiência operacional FOODY *et al.* (2024); VOGEL *et al.* (2024). Essas distinções impactam não apenas o design estrutural, como o uso de rotores maiores em turbinas *offshore*, mas também as características operacionais, como torque e velocidade.

O método de otimização desenvolvido nesta pesquisa é aplicável tanto a turbinas *onshore* quanto *offshore*, porém, apresenta benefícios significativos para aplicações *offshore*. Isso ocorre porque o perfil otimizado resulta em maiores valores de torque, uma característica crucial para turbinas *offshore*, que operam em velocidades rotacionais mais baixas e enfrentam maiores cargas de vento. Essa abordagem permite maior eficiência na conversão de energia eólica em energia elétrica, especialmente em condições marítimas que favorecem altos torques e menores velocidades de operação FOODY *et al.* (2024); VOGEL *et al.* (2024). Assim, a metodologia proposta se mostra versátil ao atender as demandas de ambos os cenários, ao mesmo tempo em que potencializa a geração de energia em aplicações *offshore*, alinhando-se às tendências e avanços do setor.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta pesquisa é desenvolver uma metodologia híbrida para otimização de aerofólios específicos para turbinas HAWTs *offshore*. Essa metodologia buscará melhorar a razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto, um fator determinante para a eficiência energética. Para isso, é desenvolvido um algoritmo que une a estrutura de otimização com a Teoria do Momento do Elemento de Pá (*Blade Element Momentum Theory* - BEMT), que permitirá avaliar o desempenho da turbina otimizada.

1.4.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos desta dissertação, busca-se aprimorar a função objetivo que utiliza o método de painéis para calcular os coeficientes aerodinâmicos com maior agilidade, o que permite identificar configurações geométricas que maximizem o desempenho das pás da turbina. O aprimoramento destacado é em razão de ajustes de parâmetros e modificações diretas da função.

Além disso, são realizadas comparações entre diferentes abordagens de parametrização, com o intuito de avaliar quais métodos são mais eficazes e adequados para caracterizar um aerofólio com a menor quantidade de pontos possíveis, etapa crucial para diminuir a complexidade do trabalho.

No entanto, é crucial que as modificações geométricas sejam implementadas com cautela. Alterações excessivas podem comprometer a viabilidade de construção dos aerofólios, tornando o processo de fabricação mais complexo ou inviável. Dessa forma, é necessário encontrar um equilíbrio entre o aumento da eficiência aerodinâmica e a viabilidade prática de fabricação. Esse aspecto será cuidadosamente avaliado ao longo desta dissertação, considerando tanto os avanços em desempenho quanto as limitações construtivas.

1.5 Metodologia

A metodologia deste trabalho foi estruturada com base em uma revisão aprofundada da literatura, que orientou a escolha das abordagens teóricas e computacionais. Inicialmente, desenvolveram-se algoritmos voltados para a otimização geométrica de aerofólios acoplados à BEMT e métodos de simulação aerodinâmica, como o XFOIL. Esses algoritmos foram testados individualmente e, em seguida, integrados para maximizar a eficiência aerodinâmica das turbinas eólicas *offshore*.

Essa integração permitiu avaliar o desempenho otimizado das turbinas, levando em conta parâmetros como coeficientes de sustentação e arrasto. A metodologia priorizou o equilíbrio entre eficiência aerodinâmica e viabilidade prática de construção, considerando as limitações geométricas e fabris. O detalhamento completo de cada etapa e dos algoritmos será apresentado em capítulos subsequentes, acompanhado por fluxogramas que ilustram o processo de otimização e integração.

1.6 Contribuições do Trabalho

Espera-se que esta dissertação contribua de forma inovadora para o campo de turbinas eólicas *offshore*, especialmente na otimização aerodinâmica de aerofólios. O principal diferencial do trabalho está no desenvolvimento e aplicação de uma metodologia híbrida para a otimização, que combina os algoritmos de Evolução Diferenciada e Enxame de Partículas. Essa abordagem, ainda não explorada na literatura específica sobre turbinas *offshore*, destaca-se como um caso particular, especialmente em comparação com o estado da arte revisado, como evidenciado pelo trabalho de SHARMA *et al.* (2021), onde nenhuma metodologia similar foi encontrada para esse contexto. A metodologia híbrida permite explorar de forma mais robusta o espaço de soluções, equilibrando eficiência computacional e precisão, ao mesmo tempo que aborda os desafios específicos das turbinas *offshore*.

Além disso, o presente trabalho diferencia-se dos estudos avaliados de HANSEN (2018) e RIBEIRO *et al.* (2012) em dois aspectos principais. Primeiro, na metodologia de otimização adotada: enquanto esses autores utilizaram abordagens distintas para a otimização de aerofólios, a presente dissertação avança ao implementar uma combinação de algoritmos que potencializa a exploração e a exploração das soluções. Segundo, na avaliação do desempenho aerodinâmico, que aqui é realizada com base na Teoria do Momento do Elemento de Pá, uma ferramenta amplamente consagrada, mas aqui aplicada com refinamentos específicos que incluem correções, como a de Glauert, para aumentar a precisão nas análises comparativas.

Embora o trabalho esteja limitado pelo uso de métodos computacionais simplificados e pela ausência de dados experimentais extensivos, essas restrições não comprometem a validade das conclusões. Pelo contrário, criam oportunidades para futuras investigações, que podem expandir os resultados obtidos, integrando medições experimentais e modelos computacionais mais complexos para fornecer uma compreensão ainda mais robusta da eficiência aerodinâmica de turbinas eólicas. Desta forma, espera-se que esta dissertação ofereça uma base sólida para avanços subsequentes, contribuindo tanto para o aprimoramento

1.7 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em capítulos que seguem uma progressão lógica, facilitando o entendimento do leitor e permitindo uma análise clara do tema abordado. O primeiro capítulo, Introdução, situa o leitor no contexto da pesquisa, destacando a relevância do tema e os principais objetivos do estudo. Em seguida, o segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, explora o estado da arte, abordando as principais teorias e estudos relevantes que fundamentam a pesquisa, oferecendo uma base sólida para as próximas discussões.

No terceiro capítulo, Método Proposto, são detalhadas as etapas metodológicas aplicadas, incluindo o desenvolvimento dos algoritmos e as técnicas de otimização adotadas para melhorar o desempenho dos aerofólios das turbinas *offshore*. O quarto capítulo, Resultados e Discussões, apresenta os dados obtidos com base na metodologia proposta, realizando uma análise crítica dos resultados em relação aos objetivos previamente estabelecidos. Por fim, o quinto capítulo, Conclusões, sintetiza os principais achados do trabalho, discutindo as implicações dos resultados e sugerindo possíveis caminhos para futuras pesquisas na área.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Para iniciar o processo de desenvolvimento de um projeto, a etapa primordial consiste na realização de uma análise bibliográfica detalhada. Essa análise visa aprofundar o entendimento do tema em questão e examinar o estado da arte, possibilitando mapear as tecnologias vigentes e emergentes relacionadas ao tópico. Nesse contexto, este capítulo se concentra na apresentação da situação atual do tópico proposto, abrangendo os princípios da energia eólica, modelagem de aerogeradores, algoritmos de otimização e a parametrização de aerofólios.

2.1 Energia Eólica

As raízes das turbinas eólicas remontam à antiguidade, a conversão da energia proveniente dos ventos em energia mecânica apresentam registros de cerca de 3000 anos atrás. Inicialmente, os moinhos de vento eram empregados a diversas tarefas, desde a elevação de água até a moagem de grãos e a extração de óleos de sementes. Essas primeiras máquinas eram caracterizadas por sua simplicidade e rusticidade, o que resultava em uma capacidade de geração de energia limitada BURTON *et al.* (2001).

Com o decorrer dos anos e o avanço da tecnologia, a demanda por energia foi continuamente aumentando. Embora em um determinado ponto, os moinhos de vento tenham desempenhado um papel vital na economia rural, a ascensão de motores econômicos movidos por combustíveis fósseis os relegou ao segundo plano, tornando os combustíveis fósseis a fonte predominante de energia. Esse cenário desacelerou o progresso das tecnologias eólicas BURTON *et al.* (2001).

O interesse em turbinas eólicas experimentou um ressurgimento notável nas décadas de 1970 e 1980, à medida que a crise do petróleo intensificou a busca por alternativas energéticas. Nesse período, foram estabelecidos grandes parques eólicos em diversas regiões do mundo, empregando turbinas de porte intermediário. Embora essas turbinas fossem capazes de gerar quantidades substanciais de eletricidade,

ainda enfrentavam desafios relacionados a custos e confiabilidade.

Como apresentado pelo IPCC (2011); EERE, OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY (2024), nos últimos anos uma tendência marcante foi a crescente ampliação das dimensões e da capacidade das turbinas eólicas, como demonstrado pela Figura 2.1. As versões modernas dessas turbinas se destacam por seu notável aumento de tamanho, com pás que podem alcançar extensões superiores a 120 metros, para os casos *onshore*. Esse avanço tem contribuído de forma substancial para o aumento da capacidade de geração de energia eólica, consolidando-a como uma parte significativa das fontes de energia em muitos países.

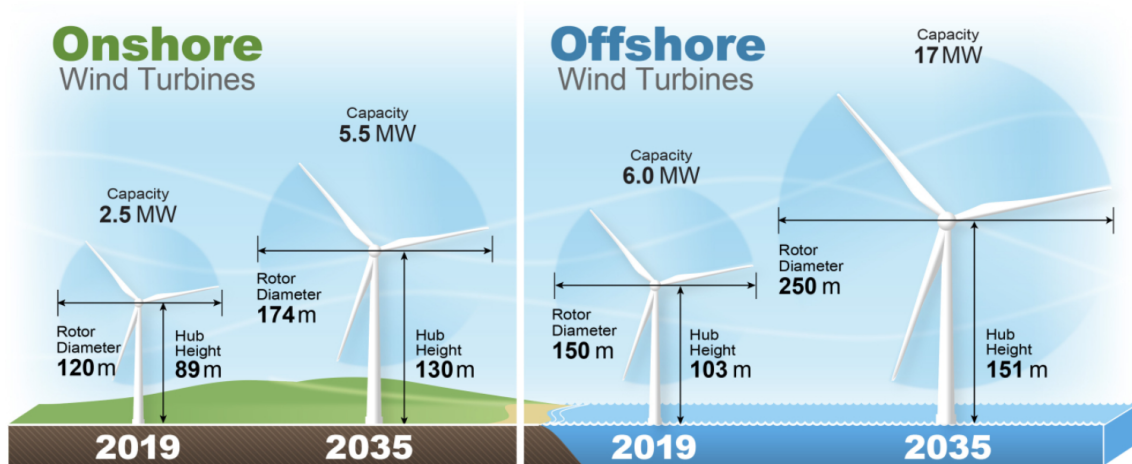


Figura 2.1: Desenvolvimento do tamanho das turbinas eólicas ao longo dos anos. Fonte: Adaptado de EERE, OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY (2024)

Conforme a necessidade por fontes de energia renovável aumenta, a evolução tecnológica das turbinas eólicas avança. Investigações voltadas para o desenvolvimento de materiais mais leves, sistemas de armazenamento aprimorados e a integração eficaz de fontes de energia variável nas redes elétricas estão delineando o futuro das turbinas eólicas. Antecipa-se que essas turbinas desempenharão um papel cada vez mais relevante na transição para uma matriz energética mais sustentável e no enfrentamento das questões relacionadas às mudanças climáticas.

As turbinas eólicas podem ser categorizadas com base na orientação dos eixos de seus rotores, o que as divide em dois tipos: de eixo horizontal e eixo vertical. As aerogeradores de eixo horizontal se caracterizam pela disposição perpendicular das pás da turbina em relação ao vento incidente, conforme ilustrado na Figura 2.2(a). Por outro lado, as turbinas de eixo vertical, mostradas na Figura 2.2(b), operam de forma distinta às de eixo horizontal.

As turbinas de eixo horizontal serão o foco desta dissertação, exigindo, portanto, uma análise mais aprofundada de sua estrutura. Essas turbinas consistem em diversas partes integrantes, conforme evidenciado pela Figura 2.3, cada uma de-

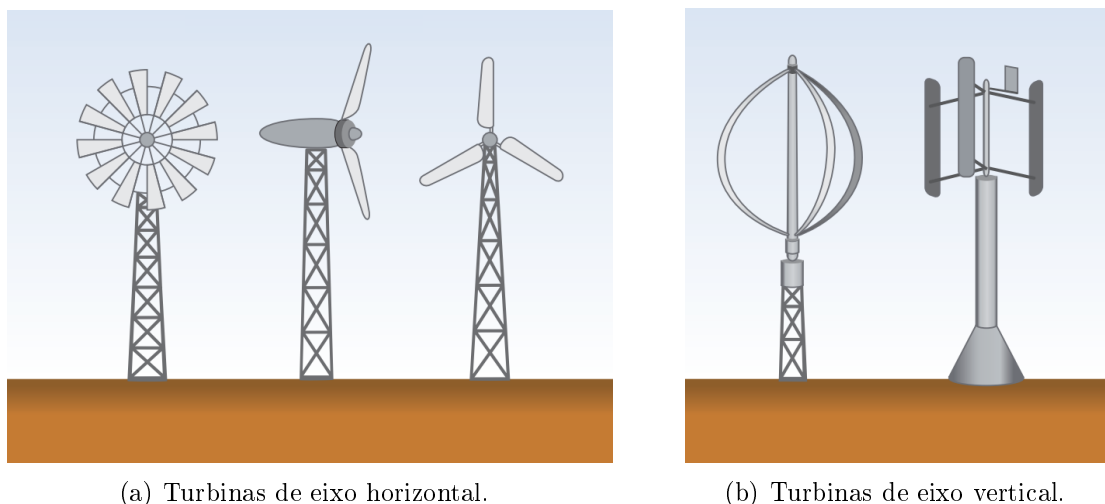


Figura 2.2: Diferentes orientações de eixo para turbinas eólicas. Fonte: IPCC (2011)

sempenhando uma função crucial no processo de geração de energia eólica. O rotor, composto pelas pás e pelo nariz ou hub que as sustenta, é o componente central responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. Em determinadas turbinas, a transmissão e a caixa multiplicadora conduzem a energia mecânica do eixo do rotor para o gerador, enquanto, em outras, o eixo do rotor é diretamente acoplado ao gerador, eliminando esse componente intermediário BURTON *et al.* (2001); IPCC (2011).

O gerador elétrico converte a energia mecânica gerada pelo rotor em energia elétrica utilizável. Os mecanismos de controle assumem responsabilidades cruciais, incluindo a orientação do rotor, controle de velocidade e controle do gerador. A torre desempenha um papel fundamental ao sustentar e posicionar todo o conjunto aerogerador a uma altura específica para otimizar a captação do vento. O sistema de armazenamento, por sua vez, armazena a energia produzida para atender à demanda em momentos em que a geração não é suficiente BURTON *et al.* (2001).

O transformador realiza o acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica, garantindo uma integração eficiente. Os acessórios, que incluem componentes periféricos como transmissões, freios, embreagens, eixos, acoplamentos e mancais, desempenham um papel crucial na eficiência e operação adequada do aerogerador como um todo. Essa complexa interação de subsistemas ilustra a sofisticação por trás da tecnologia das turbinas eólicas de eixo horizontal BURTON *et al.* (2001).

2.1.1 O Recurso e o Princípio Físico

A energia do Sol é uma força fundamental que sustenta a vida e impulsiona os processos naturais na Terra. Além de seu papel crucial no ciclo da água e na circulação atmosférica, a energia solar é a fonte primária por trás de muitas outras

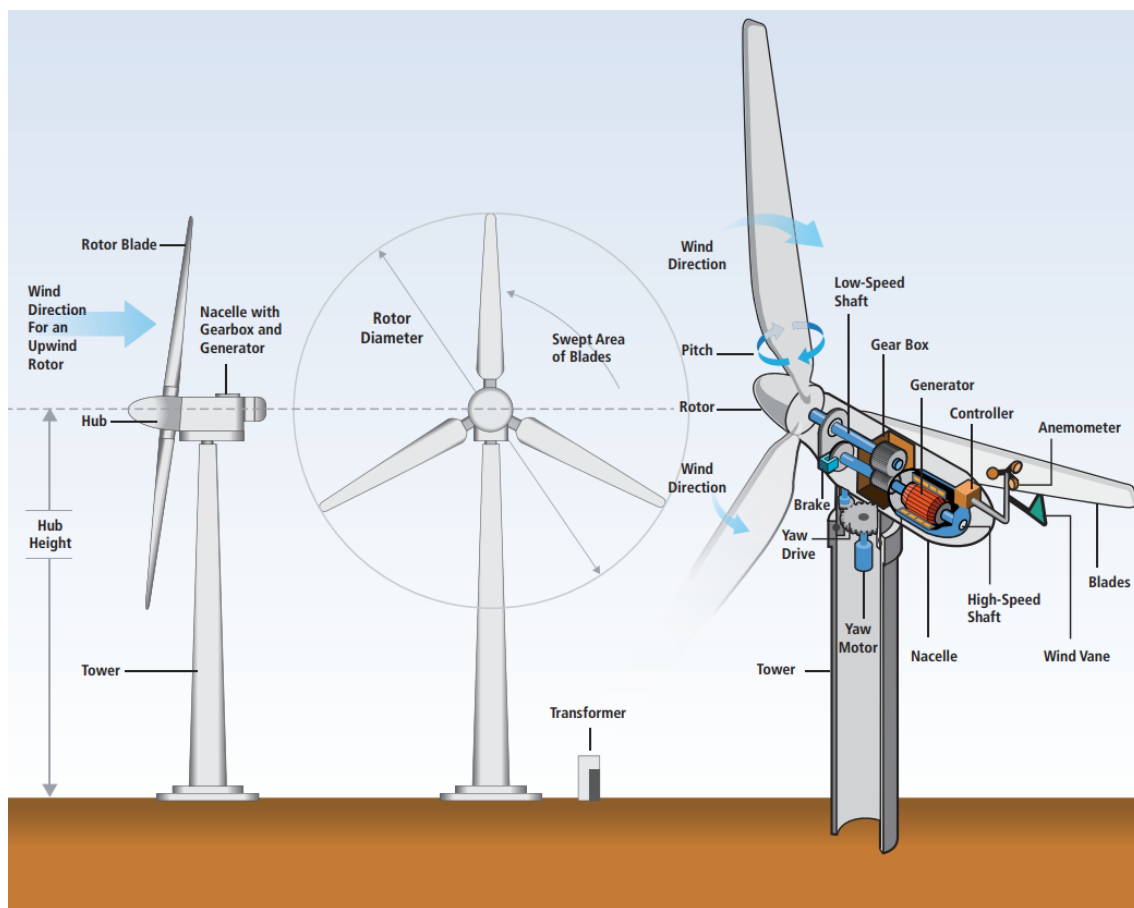


Figura 2.3: Componentes fundamentais de uma turbina eólica de eixo horizontal moderna com sistema de engrenagens. Fonte: IPCC (2011)

formas de energia. A energia fotovoltaica, que converte a luz solar em eletricidade, é apenas uma manifestação direta desse fenômeno. Outras fontes de energia, como a eólica e a hidrelétrica, têm sua origem na interação complexa entre a estrela e o planeta. Dessa forma, a compreensão e a exploração desses princípios fundamentais não apenas contribuem para a diversificação da matriz energética, mas também nos conectam diretamente à fonte primordial de energia que impulsiona os sistemas naturais do nosso planeta.

A captação da energia eólica é essencialmente um processo de transformação da energia cinética contida nos ventos em energia mecânica, a qual é, por sua vez, convertida em energia elétrica. A dinâmica por trás desse fenômeno envolve a geração de correntes de ar resultantes da variação de pressão atmosférica, principalmente devido à distribuição desigual da radiação solar na superfície terrestre. Essa disparidade de temperatura e pressão cria correntes de vento, formando um recurso energético abundante e renovável.

O processo de conversão da energia eólica é efetuado pelas turbinas eólicas, que, a partir da energia contida nos ventos, convertem-na em energia mecânica ao girar o eixo da turbina. Esta energia mecânica é então transformada em eletricidade. A po-

tência gerada pela turbina está intrinsecamente relacionada ao seu desempenho e é calculada multiplicando-se a área varrida pelas pás do rotor pelo cubo da velocidade da corrente de ar, pela massa específica do fluido e pelo coeficiente de potência, conforme expresso na Equação 2.1. Este processo exemplifica como a eficácia da conversão da energia eólica em eletricidade é influenciada por diversos fatores, destacando a importância da otimização desses componentes para melhorar a eficiência global do sistema BURTON *et al.* (2001).

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A_c v_\infty^3 \quad (2.1)$$

O princípio físico apresentado serve como base para entender o funcionamento de ambas as configurações de turbinas apresentadas. As turbinas de eixo horizontal, capturam a força aerodinâmica gerada pelo vento, movendo as pás em torno de um eixo horizontal. A transmissão desse movimento para o gerador converte a energia mecânica em eletricidade. Em contraste, as turbinas de eixo vertical possuem um eixo perpendicular ao solo, com pás verticais, oferecendo eficácia em ambientes com ventos turbulentos e multidirecionais. Essas turbinas representam uma alternativa versátil na geração de energia eólica, dispensando ajustes conforme a direção do vento.

A variabilidade nas características dos ventos, influenciada por fatores climáticos, topografia e sazonalidades, resulta em considerável flutuação na produção de energia eólica. Nesse cenário, é imperativo realizar uma coleta de dados precisa, utilizando anemômetros e sensores de direção em alturas específicas, para caracterizar a região em questão. O histórico desses dados não apenas proporciona maior previsibilidade na produção de energia, mas também facilita a identificação da localização mais adequada, otimizando a eficiência. No entanto, esse processo é oneroso e consome tempo significativo para coleta e análise. Modelos numéricos oferecem uma abordagem econômica e eficiente para analisar condições eólicas, prevendo a produção energética e identificando locais estratégicos para turbinas eólicas BURTON *et al.* (2001); PINTO *et al.* (2017).

2.1.2 Matriz Brasileira

A matriz elétrica emerge como um elemento vital na infraestrutura de uma nação, frequentemente servindo como indicador de seu desenvolvimento. Em meio à crise climática, surgem novos desafios como a busca por alternativas inovadoras e sustentáveis para suprir as crescentes demandas energéticas. Essa reflexão reflete a necessidade de repensar e transformar as abordagens tradicionais, direcionando o olhar para soluções que harmonizem desenvolvimento e responsabilidade ambiental.

O Brasil destaca-se com uma matriz energética mais sustentável, tendo mais de 50% de sua capacidade proveniente de usinas hidrelétricas, seguidas por termelétricas e eólicas, conforme evidenciado na Figura 2.4. Embora essa composição posicione a matriz brasileira como um modelo para outros países, é importante ressaltar que o país ainda enfrenta desafios diários, especialmente devido a problemas climáticos. Essas questões ressaltam a complexidade de manter um equilíbrio entre as fontes de energia e a necessidade contínua de adaptação e inovação para garantir a estabilidade e a sustentabilidade da matriz elétrica nacional ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2023); ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2023).

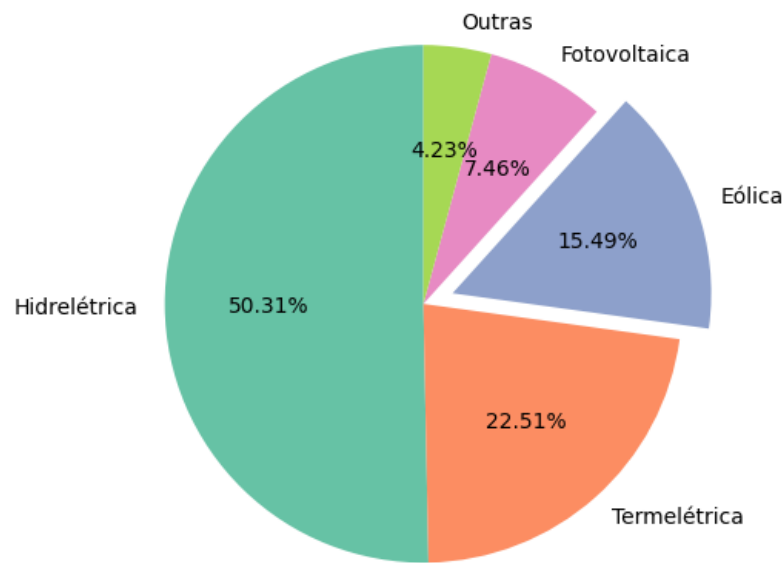


Figura 2.4: Matriz Elétrica Brasileira. Fonte: Adaptado de ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2023)

A despeito de ser, essencialmente, uma matriz elétrica de baixo impacto ambiental, a matriz elétrica brasileira viu-se desafiada pelas recentes condições de seca, resultando em problemas na produção por usinas hidrelétricas e um aumento na utilização de termelétricas. Em resposta, o Brasil procura reequilibrar sua oferta de energia, reafirmando seu compromisso com a sustentabilidade ambiental e buscando assegurar a segurança e confiabilidade no fornecimento elétrico para sua crescente população. Essa busca reflete a necessidade de adaptabilidade diante das variações climáticas e a constante busca por um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a responsabilidade ambiental.

Com o objetivo de diversificar ainda mais a matriz energética brasileira, uma alternativa em destaque é o desenvolvimento dos parques eólicos *Onshore*, conforme evidenciado na Figura 2.5, onde se destaca o notável aumento da capacidade instalada ao longo dos últimos anos. Atualmente, essa fonte de energia representa

15% da capacidade total nacional, posicionando o Brasil como o sexto maior detentor dessa tecnologia no cenário global. É importante destacar que, ao analisarmos globalmente o crescimento da nova capacidade instalada no ano de 2023, o Brasil se posicionou em terceiro lugar, essa classificação evidencia que a fonte de energia eólica ainda está em um notável estágio de expansão, com potencial para alcançar posições ainda mais proeminentes no ranking global nos próximos anos ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2023).

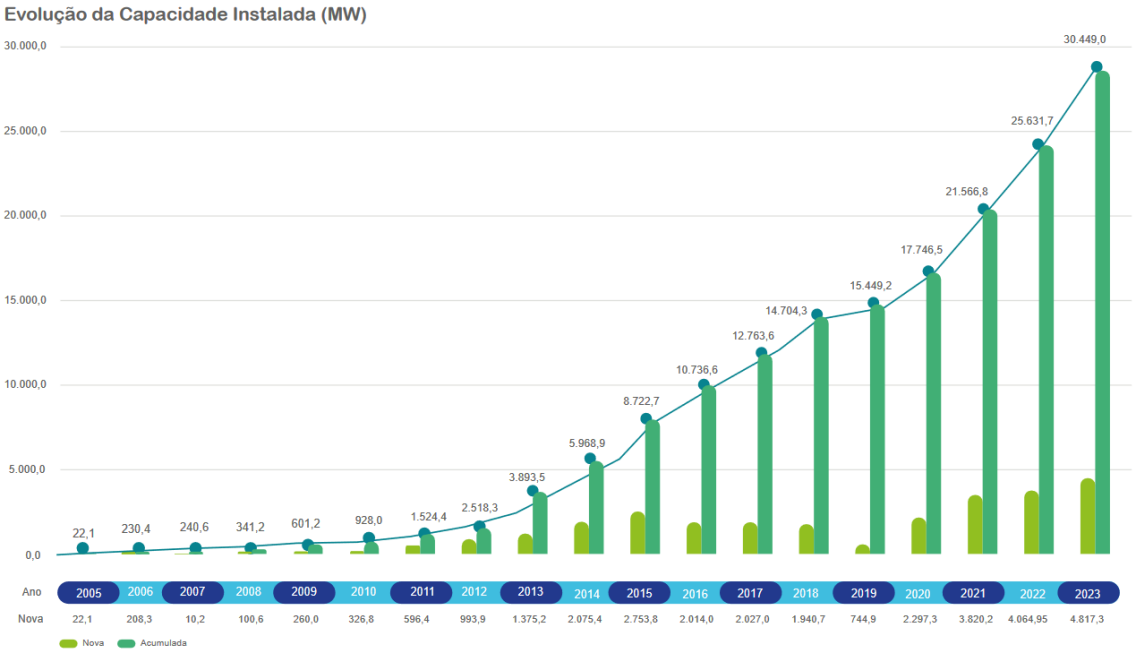


Figura 2.5: Evolução da Capacidade Instalada (MW). Fonte: ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2023)

Apesar de a transição energética direcionar a atenção para fontes provenientes do sol e dos ventos, muitos países enfrentam desafios significativos em sua implementação devido à limitada disponibilidade de recursos, em contraste com a vastidão encontrada no Brasil. Isso levou várias nações a buscar maximizar a eficiência na geração dessas fontes, resultando em uma alternativa notável: a migração das usinas eólicas para o mar, conhecidas como usinas *offshore*. Essa tendência, predominantemente seguida por países europeus e pela China, é justificada pelos elevados fatores de capacidade, o que implica em uma produção mais substancial em uma área menor.

Atualmente, o Brasil não possui nenhuma turbina eólica *offshore* ao longo de sua costa, diferentemente de países como China, Reino Unido e Alemanha, que juntos acumulam mais de 64 GW nessa modalidade. Como mencionado anteriormente, o Brasil apresenta uma considerável capacidade eólica *onshore*; entretanto, diante dos impactos ambientais e sociais causados pelas atuais usinas, a migração para usinas *offshore* emerge como uma alternativa promissora ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2024).

Informações recentes da EPE revelam que o potencial brasileiro para turbinas eólicas *offshore* é aproximadamente 700 GW em locais com profundidade de até 50 metros, justificando assim uma potencial migração em larga escala. Esse potencial já está sendo explorado, contando atualmente com mais de 96 projetos que superam 234 GW, em fase de processo de licenciamento ambiental pelo IBAMA ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (2024); EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2020).

2.1.3 Comparação entre Turbinas Eólicas *Onshore* e *Offshore*

As turbinas eólicas *onshore* e *offshore* desempenham papéis fundamentais na geração de energia renovável, cada uma apresentando características específicas que se adequam a diferentes cenários e demandas. A seguir, são discutidas as principais diferenças, vantagens, desvantagens e tendências de desenvolvimento dessas tecnologias.

As turbinas *onshore* possuem um histórico consolidado, tendo sido a principal forma de aproveitamento da energia eólica por décadas. Elas se destacam por custos mais baixos de instalação e manutenção, além de maior facilidade de acesso para construção e reparos. Essas características têm impulsionado sua ampla adoção em diversos países, especialmente em locais onde o relevo e a vegetação não comprometem significativamente a eficiência dos aerogeradores VOGEL *et al.* (2024). Contudo, essas turbinas estão sujeitas a condições de vento mais variáveis, o que pode gerar flutuações na produção de energia e qualidade inferior em comparação com seus equivalentes *offshore*.

Por outro lado, as turbinas *offshore* apresentam vantagens significativas em termos de eficiência energética. Devido aos ventos mais fortes e consistentes em ambientes marítimos, essas turbinas são capazes de produzir até o dobro da energia anual em comparação com turbinas terrestres, além de garantirem menor variabilidade e maior estabilidade na qualidade da energia FOODY *et al.* (2024). Apesar dessas vantagens, o alto custo de instalação e manutenção, aliado aos desafios logísticos e impactos potenciais nos ecossistemas marinhos, representa obstáculos importantes para a adoção mais ampla dessa tecnologia.

Em termos de tendências de desenvolvimento, as turbinas *onshore*, com sua infraestrutura estabelecida, têm apresentado taxas de crescimento estabilizadas em mercados maduros, mas ainda possuem potencial em regiões em desenvolvimento VOGEL *et al.* (2024). Por outro lado, o setor *offshore* está em rápida expansão, impulsionado por avanços tecnológicos, como turbinas maiores e mais eficientes, e políticas públicas que incentivam projetos de infraestrutura marítima FOODY *et al.* (2024).

Embora as turbinas *onshore* continuem sendo uma solução economicamente acessível e amplamente utilizada, as turbinas *offshore* se destacam pelo potencial de atender a demandas energéticas em larga escala com maior eficiência. A integração dessas duas tecnologias desempenhará um papel crucial na transição global para fontes de energia limpa e sustentável.

2.2 Fundamentos de Aerodinâmica

A aerodinâmica é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda o movimento do ar em torno de objetos sólidos e as forças e momentos gerados por essa interação. Ela desempenha um papel crucial em diversas áreas da engenharia, como aviação, automóveis, turbinas eólicas e até em esportes de alta performance. A compreensão de princípios básicos da aerodinâmica é essencial para o desenvolvimento de projetos eficientes e otimizados em tais aplicações BURTON *et al.* (2001); ANDERSON (2011).

2.2.1 Conceitos Fundamentais

O comportamento de um fluido em movimento é caracterizado por diferentes regimes de escoamento. O escoamento laminar ocorre quando as partículas do fluido se movem de forma ordenada e em camadas paralelas, enquanto o escoamento turbulento é marcado por movimentos desordenados e vórtices. Essas características influenciam diretamente as forças atuantes em um corpo ANDERSON (2011).

A relação entre a velocidade do fluido e sua pressão é descrita pela equação de Bernoulli, que afirma que, em um fluido incompressível e em escoamento estacionário, um aumento na velocidade resulta em uma diminuição da pressão. Outro parâmetro fundamental é o número de Reynolds (Re), que relaciona as forças inerciais e viscosas em um escoamento. Ele é utilizado para prever o regime de escoamento ao redor de um corpo e é expresso como:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.2)$$

onde ρ é a densidade do fluido, V a velocidade relativa, L uma dimensão característica do corpo, e μ a viscosidade dinâmica.

2.2.2 Forças Aerodinâmicas

Ao interagir com um fluido em movimento, um corpo experimenta duas forças principais: a sustentação (L) e o arrasto (D). A sustentação atua perpendicularmente à direção do escoamento, sendo crucial para aplicações como asas de aeronaves

e pás de turbinas eólicas. Já o arrasto é uma força resistiva que age paralelamente ao escoamento, reduzindo a eficiência de movimento ANDERSON (2011). A Figura 2.6 mostra de maneira simplificada o diagrama das forças apresentadas em uma aerofólio.

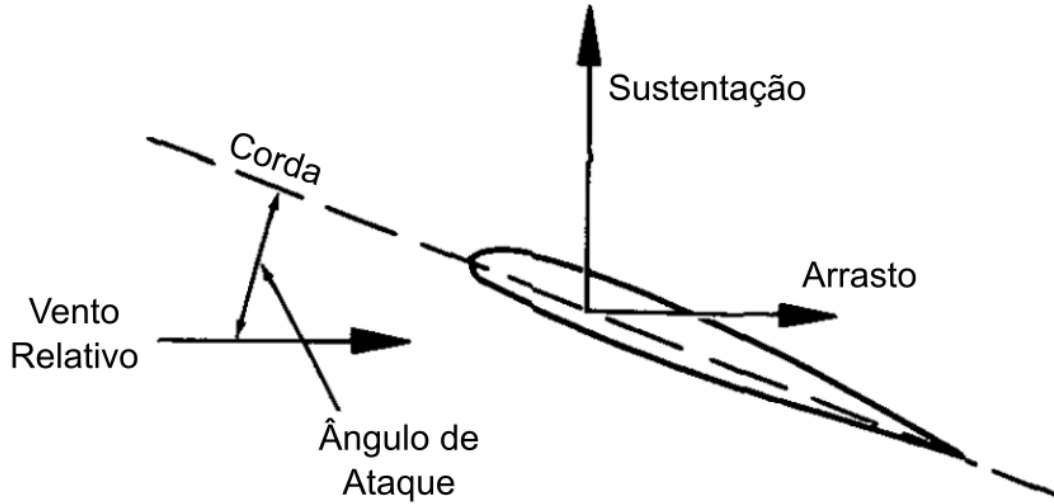


Figura 2.6: Diagrama de força em um aerofólio. Fonte: Adaptado de HURT (1965)

Essas forças são geralmente descritas por meio de coeficientes adimensionais:

Coeficiente de Sustentação (c_l):

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.3)$$

Coeficiente de Arrasto (c_d):

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.4)$$

A razão entre C_l e C_d é frequentemente usada como métrica de eficiência aerodinâmica, indicando o desempenho do aerofólio em converter o fluxo de ar em força útil.

2.2.3 Perfis Aerodinâmicos (Aerofólios)

Aerofólios são formas projetadas especificamente para maximizar a sustentação e minimizar o arrasto em aplicações aerodinâmicas ABBOTT e VON DOENHOFF (2012). A geometria de um aerofólio é definida por componentes que influenciam diretamente seu desempenho:

- **Corda (c):** A linha reta que conecta o bordo de ataque ao bordo de fuga. Representa a dimensão característica do aerofólio.

- **Bordo de Ataque:** A extremidade frontal do aerofólio, que entra em contato primeiro com o fluxo de ar. Sua curvatura influencia a resistência ao estol.
- **Bordo de Fuga:** A extremidade posterior do aerofólio, onde o fluxo de ar se encontra novamente.
- **Camber:** A curvatura média do aerofólio, medida como a distância entre a corda e a linha média do perfil. Um maior camber tende a aumentar a sustentação, mas pode elevar o arrasto.
- **Espessura:** A distância máxima entre as superfícies superior e inferior do aerofólio. Influencia a resistência estrutural e o comportamento aerodinâmico.

A Figura 2.7 exemplifica essas características geométricas, que são cruciais para determinar a eficiência aerodinâmica do aerofólio em diferentes condições operacionais.

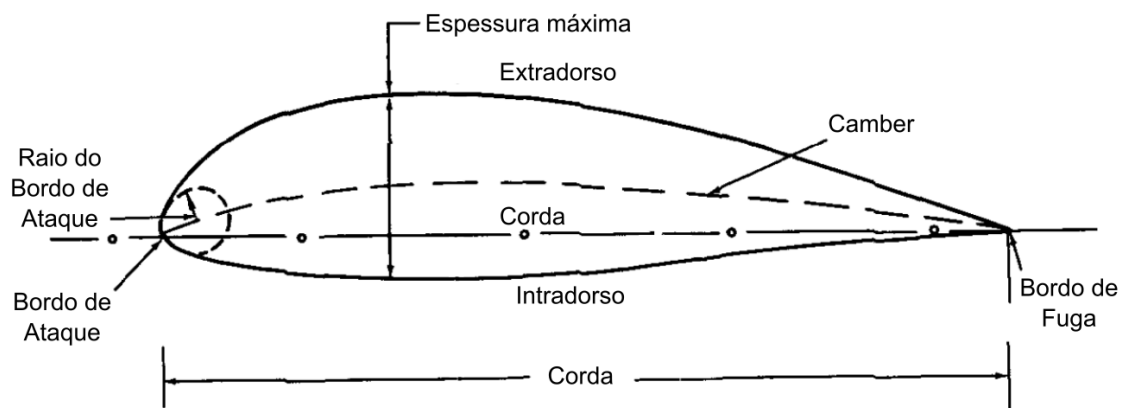


Figura 2.7: Terminologia de um aerofólio. Fonte: Adaptado de HURT (1965)

2.2.4 Ângulo de Ataque

O ângulo de ataque (α) é definido como o ângulo entre a corda do aerofólio e a direção do fluxo de ar. Ele desempenha um papel fundamental na eficiência aerodinâmica, afetando os coeficientes de sustentação e arrasto.

Em pequenos valores de α , o c_l tende a aumentar linearmente com o ângulo, mas, ao ultrapassar um valor crítico, ocorre o fenômeno de **estol**. Nesse ponto, a separação do fluxo de ar da superfície superior do aerofólio reduz drasticamente a sustentação e aumenta o arrasto, comprometendo a eficiência do aerofólio.

A compreensão desses conceitos, aliada ao controle das características geométricas, é essencial para o desenvolvimento de aerofólios otimizados e com alta eficiência aerodinâmica em aplicações práticas.

2.3 Algoritmo de Otimização

Um algoritmo de otimização é um conjunto de regras e procedimentos sequenciais desenvolvidos para buscar a melhor solução em um problema específico, geralmente definido por um conjunto de critérios ou objetivos. O objetivo central de tais algoritmos é maximizar ou minimizar uma função objetivo, como pode ser demonstrado de maneira simples pela Figura 2.8. A chamada função objetivo mede o desempenho ou a qualidade da solução, ao mesmo tempo em que respeita quaisquer restrições impostas pelo problema.

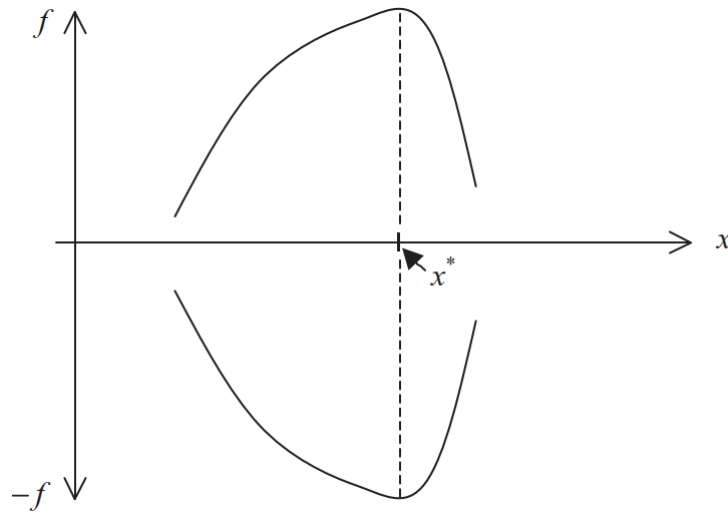


Figura 2.8: Exemplificação de máximo/mínimo de uma função. Fonte: BELEGUNDU e CHANDRUPATLA (2019)

Esses algoritmos podem ser aplicados a uma ampla gama de contextos, como: engenharia, finanças, aprendizado de máquina, entre outros. Com a finalidade de aprimorar a eficiência, tomada de decisões e a qualidade em diversas áreas. Como é possível supor, existem diversos algoritmos com diferentes princípios, a eficiência computacional e a escolha do método de busca são aspectos cruciais no desenvolvimento de algoritmos de otimização, já que o objetivo é encontrar soluções ótimas em tempo viável.

Os principais métodos empregados para otimizar funções objetivo podem ser categorizados em dois grupos distintos: os métodos determinísticos e os métodos heurísticos. A distinção crucial entre essas abordagens reside na base teórica e matemática que sustenta os métodos determinísticos, em contraste com os métodos heurísticos, que se apoiam na estruturação com base em conhecimento e experiências empíricas. Além dessas duas categorias, também existem formulações que buscam combinar elementos dos dois métodos, resultando em métodos híbridos COLAÇO *et al.* (2006).

A escolha do algoritmo para resolver um problema específico é influenciada pela natureza das soluções necessárias, a complexidade do problema, a flexibilidade requerida e a facilidade de implementação e análise. Não existe um algoritmo universal que funcione para todos os casos, mas sim uma variedade de opções que podem ser selecionadas com base nas características específicas de cada problema Yan (2013); Ali (2022).

Em uma otimização, o objetivo é encontrar as entradas que minimizam ou maximizam uma determinada função. No entanto, dependendo da natureza da função, pode haver múltiplas soluções ou, pelo menos, soluções aparentes. Ao analisarmos a Figura 2.9, podemos identificar certas características comuns em diversas funções, como a presença de mínimos com diferentes perfis. Estes mínimos podem representar um desafio na busca pela solução ótima do problema, pois podem levar à armadilha dos chamados mínimos locais, que, embora sejam pontos de mínimo, não correspondem à solução global ótima. Esta questão orienta a escolha do algoritmo a ser utilizado: os métodos determinísticos correm o risco de ficar presos em mínimos locais se não receberem uma estimativa inicial precisa, enquanto os métodos heurísticos, embora menos propensos a esse problema, podem exigir mais tempo de computação BELEGUNDU e CHANDRUPATLA (2019).

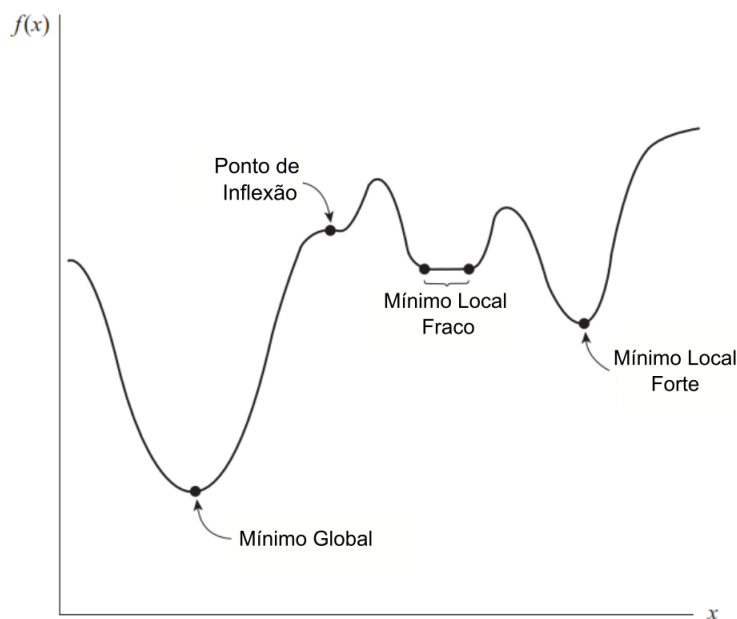


Figura 2.9: Exemplificação dos diferentes mínimos de uma função. Fonte: Adaptado de BELEGUNDU e CHANDRUPATLA (2019)

Mais adiante, será apresentada a função objetivo que será utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Vale adiantar que esta função é complexa, especialmente devido à quantidade e à sensibilidade das variáveis envolvidas. Diante disso, é comum encontrar na literatura um amplo uso de métodos heurísticos, que se mostram

mais adequados para esse tipo de problema, embora frequentemente demandem um alto tempo de processamento. Com o objetivo de avançar na área e superar tais desafios, propõe-se uma metodologia de otimização híbrida, que combina diferentes algoritmos, com o intuito de para avaliar o problema de uma perspectiva diferente SHARMA *et al.* (2021); Yan (2013).

2.3.1 Evolução Diferenciada

Como mencionado anteriormente, os métodos heurísticos têm suas raízes na observação de fenômenos naturais. O método da evolução diferenciada, por exemplo, encontra sua inspiração na teoria da evolução das espécies de Darwin. De acordo com essa teoria, os indivíduos de uma população que exibem características de sobrevivência mais favoráveis em seu ambiente têm maior probabilidade de sobreviver e se reproduzir COLAÇO *et al.* (2006).

Nesse contexto, o algoritmo tem início com uma população aleatória que evolui ao longo de várias gerações, visando identificar os indivíduos mais adaptados, ou seja, aqueles que melhor atendem aos critérios da função objetivo. Entre cada geração, ocorre o processo de *crossover*, que envolve a combinação de dois indivíduos distintos, resultando na criação de um novo indivíduo, conhecido como descendente. Durante essa fase, podem ocorrer mutações, que são pequenas alterações genéticas, desempenhando um papel fundamental ao ajudar o método a escapar de ótimos locais e a explorar soluções alternativas COLAÇO *et al.* (2006).

Embora não seja um método que possua uma prova matemática de convergência, é possível descrevê-lo por meio da Equação 2.5. Essa equação é utilizada para definir um novo indivíduo na população, determinando sua posição no espaço de soluções a partir de uma combinação linear entre indivíduos previamente selecionados.

$$\mathbf{x}^{k+1} = \delta_1 \mathbf{x}^k + \delta_2 [\alpha + F_p(\beta - \gamma)] \quad (2.5)$$

onde α , β e γ são três indivíduos da população escolhidos de forma aleatória, e δ_1 e δ_2 são as chamadas funções delta de Dirac, que podem assumir valores 0 ou 1, dependendo da condição, como pode-se observar abaixo.

$$\delta_1 = \begin{cases} 0, & \text{se } R < CR \\ 1, & \text{se } R > CR \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 0, & \text{se } R < CR \\ 1, & \text{se } R > CR \end{cases} \quad (2.7)$$

O valor de R utilizado no condicional da função delta de Dirac representa um número randômico entre 0 e 1, enquanto, o fator de *crossover* (CR) que pode

assumir valores entre 0,5 e 1,0. Por fim, F_p é a função peso ($0,5 > F_p < 1,0$) que, associada aos δ , definem a mutação.

Segundo AHMAD *et al.* (2022), o algoritmo é amplamente estudado para otimização em engenharia, com variantes desenvolvidas para melhorar sua eficácia e eficiência. Modificações mostraram ganhos significativos em precisão e eficiência de pesquisa, tornando-as eficazes na solução de problemas reais. No entanto, ajustar parâmetros pode ser demorado e computacionalmente intensivo e, por isso, nem sempre supera outros algoritmos, exigindo uma análise cuidadosa. Compreender as configurações de parâmetros é crucial para evitar problemas de desempenho e convergência.

2.3.2 Enxame de Partículas

Agora, será introduzido outro método heurístico amplamente utilizado: o Particle Swarm Optimization (PSO), conhecido em português como Otimização por Enxame de Partículas. Idealizado pelos Drs. Eberhart e Kennedy em 1995, o PSO é uma técnica de otimização inspirada no comportamento social de pássaros e peixes. O método busca imitar a inteligência coletiva dos enxames naturais, onde os indivíduos interagem entre si para buscar soluções ótimas em um espaço de busca multidimensional. Ao longo das últimas duas décadas, o PSO ganhou destaque em diversos campos científicos e tecnológicos, mostrando-se eficaz e versátil em problemas de otimização complexos e interdisciplinares RANA *et al.* (2023); EHTERAM *et al.* (2023).

O PSO simplifica a resolução de problemas complexos ao utilizar os princípios da inteligência de enxame, em que as partículas (representando soluções) ajustam iterativamente suas posições no espaço de busca para encontrar a solução ideal. Seu funcionamento básico envolve a inicialização de uma população de partículas, a avaliação de sua aptidão com base em uma função objetivo, a atualização de suas velocidades e posições e a otimização iterativa até que a convergência seja atingida. Recentemente, o PSO tem sido alvo de avanços significativos, incluindo modificações em seus parâmetros para melhorar o desempenho, a hibridização com outros algoritmos para aumentar sua eficácia e sua aplicação em uma variedade de disciplinas, demonstrando sua adaptabilidade e utilidade em uma variedade de contextos de otimização RANA *et al.* (2023).

A heurística baseada em comportamentos sociais é fundamentada em dois princípios essenciais: individualidade e sociabilidade. Facilmente observada em pássaros e peixes, essa abordagem se inspira no comportamento de grupos animais, como bandos de pássaros migratórios e cardumes de peixes. No contexto do PSO, as par-

tículas individuais representam os membros do enxame, enquanto suas posições no espaço de busca refletem o comportamento coletivo do grupo. Esse método utiliza a inteligência coletiva dos membros do enxame para explorar o espaço de busca em busca da solução ótima, onde cada partícula é influenciada tanto pela melhor solução encontrada por ela mesma quanto pelas soluções encontradas pelo grupo como um todo. Essa interação entre as partículas permite uma busca eficiente e adaptável, levando a resultados promissores em uma ampla gama de problemas de otimização.

A busca pelo ponto de mínimo ou máximo é essencialmente uma jornada individual, embora se espere que todos os indivíduos do conjunto converjam para um único ponto ótimo. Em termos gerais, o movimento de cada indivíduo é descrito pela Equação 2.8, na qual a posição futura é determinada pela posição atual adicionada a um deslocamento.

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (2.8)$$

- i → Indivíduo da população
- $\mathbf{x}_i^k$ → Posição atual do indivíduo i
- $\mathbf{v}_i^{k+1}$ → Direção de procura

A direção da busca está intimamente ligada aos dois aspectos abordados: individualidade e sociabilidade. Essa relação pode ser descrita pela Equação 2.9, que também introduz o conceito de inércia, representando a tendência do indivíduo de manter a direção do movimento anterior. Os outros termos da equação descrevem o movimento em direção ao melhor local encontrado pelo próprio indivíduo (individualidade) e ao melhor local observado por toda a população (sociabilidade).

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \alpha \mathbf{v}_i^k + \beta \gamma_{1i}(\mathbf{P}_i - \mathbf{x}_i^k) + \beta \gamma_{2i}(\mathbf{P}_g - \mathbf{x}_i^k) \quad (2.9)$$

onde:

- $\mathbf{P}_i$ → Melhor lugar observado pelo indivíduo i
- $\mathbf{P}_g$ → Melhor lugar observado por toda a população
- α → Peso associado a Inércia
- β → Peso associado a Individualidade e Sociabilidade
- $\alpha \mathbf{v}_i^k$ → Termo associado a Inércia
- $\beta \gamma_{1i}(\mathbf{P}_i - \mathbf{x}_i^k)$ → Termo associado a Individualidade
- $\beta \gamma_{2i}(\mathbf{P}_g - \mathbf{x}_i^k)$ → Termo associado a Sociabilidade

O resultado do movimento está, portanto, vinculado a esses três fatores e pode ser mais claramente visualizado na Figura 2.10. Na imagem, percebe-se a relevância dos pesos associados, pois estão diretamente ligados ao módulo dos vetores, aumentando a tendência da direção em seguir uma determinada trajetória. Após um número adequado de iterações, espera-se que o algoritmo convirja para um ponto comum, o ótimo global.

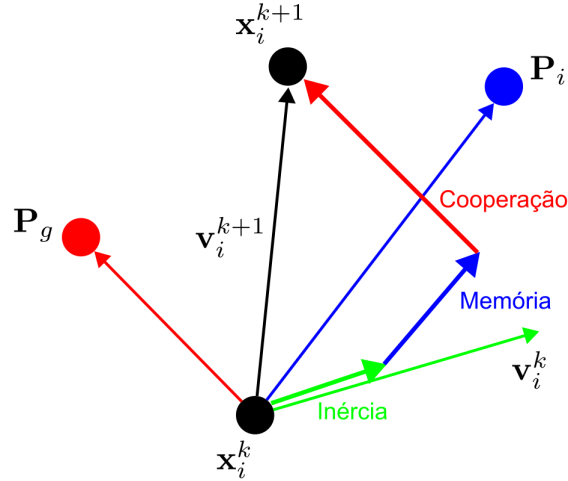


Figura 2.10: Esquemático da direção de procura. Fonte: Adaptado de GRANDIS e MAULANA (2017)

Segundo RANA *et al.* (2023) o algoritmo se destaca por sua simplicidade de implementação, permitindo sua aplicação em uma variedade de problemas, e por sua capacidade de realizar otimizações globais, encontrando soluções ótimas em espaços de busca amplos. Sua eficiência computacional também é notável, permitindo a rápida resolução de problemas complexos, enquanto sua versatilidade o torna adaptável e combinável com outros métodos. No entanto, suas deficiências incluem convergência prematura, limitação na exploração do espaço de busca, sensibilidade aos parâmetros e falta de garantia de convergência. Estes aspectos demandam uma análise cuidadosa e ajustes adequados durante sua implementação para garantir resultados satisfatórios.

2.3.3 Método Híbrido

Ao combinar algoritmos e formar os chamados métodos híbridos, o objetivo é aproveitar as vantagens de cada abordagem. Uma estratégia comum para melhorar o desempenho na otimização de uma função objetivo é utilizar combinações entre abordagens heurísticas e determinísticas, tirando proveito das vantagens de ambas. Conhecendo as limitações dos métodos determinísticos, que tendem a ficar presos em mínimos locais, e a capacidade dos métodos heurísticos de explorar a função

de forma abrangente, embora de maneira mais lenta, a fusão desses métodos busca atingir uma convergência mais eficiente. COLAÇO *et al.* (2006).

Embora frequentemente combinem abordagens heurísticas e determinísticas, é importante notar que essa fusão não se restringe exclusivamente a esses dois tipos de algoritmos. Há uma ampla liberdade para criar métodos que atendam às necessidades particulares de cada problema, podendo-se unir mais de um algoritmo e formar soluções mesmo dentro de um mesmo grupo. Por exemplo, o uso de dois métodos heurísticos pode ser benéfico para a resolução de problemas mais complexos, aproveitando as características únicas de cada um para encontrar soluções mais eficientes.

A combinação de algoritmos pode variar significativamente de acordo com as características específicas do problema em questão, bem como das preferências e experiências dos pesquisadores. No âmbito deste trabalho, propõe-se uma abordagem híbrida entre dois métodos heurísticos amplamente utilizados: o Enxame de Partículas e a Evolução Diferenciada. Essa escolha foi motivada pela complementaridade entre esses métodos, cada um contribuindo com suas vantagens e abordagens distintas. A representação esquemática deste método é apresentada na Figura 2.11 e será detalhada e aprimorada no capítulo de metodologia.

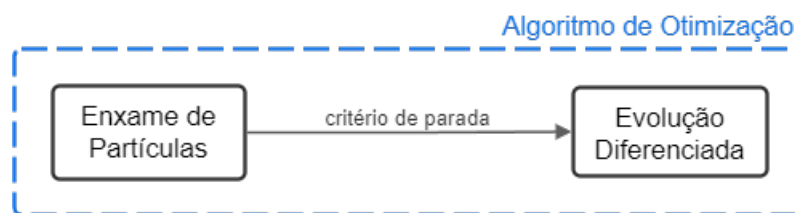


Figura 2.11: Esquemático simplificado do método híbrido.

O método híbrido proposto busca aproveitar o melhor de cada algoritmo, criando uma sinergia que potencializa a capacidade de exploração e otimização. Inicialmente, será criada uma população inicial para o método de enxame de partículas, visando varrer amplamente a área de busca e encontrar regiões de convergência potenciais. Após atingir um critério de parada pré-estabelecido, essa mesma população será utilizada como entrada para o algoritmo de evolução diferenciada. Dessa forma, será possível explorar a diversidade genética da população inicial, combinando indivíduos e suas mutações para alcançar uma solução final mais robusta e eficiente. A expectativa é que essa abordagem híbrida permita alcançar o resultado desejado de forma mais eficaz do que os métodos individuais isolados, contribuindo para avanços significativos na área de otimização e resolução de problemas complexos.

2.3.4 Função Objetivo: XFoil

Conforme previamente exposto, na abordagem de um problema de otimização, é essencial a definição de uma função objetivo, que desempenha o papel de avaliar a qualidade ou desempenho da solução, levando em consideração as restrições estabelecidas. Dado que um dos propósitos deste trabalho é aprimorar os coeficientes aerodinâmicos de aerofólios, a função objetivo deve, portanto, estimar eficientemente tais coeficientes.

Diversas estratégias podem ser empregadas na análise aerodinâmica, contudo, dado que o processo de otimização já demanda tempo considerável, optou-se pela utilização do software de código aberto XFoil, desenvolvido por DRELA (1989). O software XFoil foi desenvolvido com o intuito de oferecer análises precisas em baixos números de Reynolds ($\leq 5 \times 10^5$), apresentando simultaneamente um baixo custo computacional para acelerar as simulações. Sua abordagem combina o método dos painéis com a interação entre escoamento viscoso e não viscoso, utilizando conceitos de camada limite de Prandtl, proporcionando uma análise eficiente com mínima separação no bordo de fuga DRELA (1989).

Embora inicialmente concebido para aplicações em baixos números de Reynolds, o software tornou-se uma escolha frequente como função objetivo, conforme destacado por SHARMA *et al.* (2021). Importante notar que, da mesma forma que alguns pesquisadores realizam modificações em certos parâmetros para aprimorar o desempenho aerodinâmico do aerofólio, este trabalho seguirá essa mesma abordagem, apresentando os procedimentos e resultados nos Capítulos 3 e 4 HANSEN (2018).

2.4 Parametrização de Aerofólios

No decorrer do Capítulo 2, foram introduzidos conceitos essenciais para uma compreensão de um projeto de otimização. Discutiram-se diversos métodos, a função objetivo e, agora, abordaremos outro aspecto crucial nesta seção: os parâmetros de entrada. Dado que o foco é otimizar o perfil de um aerofólio, as informações relacionadas à sua geometria são empregadas como entradas no processo de otimização.

Frequentemente, para descrever uma curva que representa um perfil aerodinâmico, é necessário um grande número de pontos cartesianos, o que, em termos de otimização, pode aumentar a complexidade. Diante dessa situação, muitos autores optam por adotar métodos de parametrização de aerofólios, visando reduzir a quantidade de pontos necessários para descrever a curva desejada. Dois dos principais métodos utilizados para esse fim são o PARSEC DA S. NETO *et al.* (2017) e a Curva de Bézier RIBEIRO *et al.* (2012); SHARMA *et al.* (2021); WEI *et al.* (2020).

Como apresentado por RIBEIRO *et al.* (2012), os métodos de otimização devem ser flexíveis, abrangendo um amplo espaço de busca para formas "não tradicionais". Além disso, é essencial manter um número reduzido de parâmetros de design, evitar descontinuidades, eliminar variáveis insignificantes para o desempenho aerodinâmico e vincular as variáveis de design diretamente às restrições. Assim, optou-se por utilizar a Curva de Bézier neste trabalho, dada sua ampla aplicabilidade, como ressaltado por vários pesquisadores RIBEIRO *et al.* (2012); SALUNKE *et al.* (2014).

As equações utilizadas para os métodos mencionados neste trabalho foram desenvolvidas por MOHEBBI (2014) e são apresentadas a seguir (Equação 2.10), destacando-se o método Bézier como uma representação matemática frequentemente empregada para parametrizar perfis aerodinâmicos. Essa abordagem, uma variante da descrição por B-Spline, oferece a capacidade de criar curvas complexas a partir de alguns pontos de controle, garantindo uma precisão adequada, uma característica valiosa para métodos de otimização.

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t) \quad (2.10)$$

A Equação 2.10 descreve um ponto $P(t)$ em uma curva de Bézier para um dado parâmetro t , variando entre 0 e 1, utilizando os pontos de controle B_i e os polinômios de base de Bernstein $J_{n,i}(t)$. Esses polinômios, definidos como

$$J_{n,i}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (2.11)$$

influenciam em cada ponto de controle na curva. Na equação, n representa o grau da curva, sendo igual ao número total de pontos de controle menos um ($n+1$), i é o índice do ponto de controle, e $\frac{n!}{i!(n-i)!}$ é o coeficiente binomial que determina o peso relativo de cada termo. O termo $t^i(1-t)^{n-i}$ ajusta a contribuição de cada ponto de controle com base no valor de t , garantindo que a curva seja suavemente definida como uma soma ponderada dos pontos de controle.

Utilizando a Equação 2.10, é possível determinar os pontos cartesianos de uma curva específica. No entanto, o desafio reside na definição dos chamados pontos de controle (B_i). Em outras palavras, ao desejar descrever uma curva conhecida, é necessário calcular os pontos de controle. Para realizar essa tarefa, é preciso reescrever a equação na forma matricial, conforme apresentado abaixo:

$$[P(t)] = [J(t)] [B]. \quad (2.12)$$

Se o número de pontos da superfície do aerofólio escolhido for m , enquanto n é o grau da curva de Bézier. Assim, a equação 2.12 pode ser expressa com as dimensões matriciais apropriadas.

$$[P(t)]_{nx2} = [J(t)]_{mx(n+1)} [B]_{(n+1)x2} \quad (2.13)$$

Agora, serão realizadas operações algébricas para determinar os pontos de controle de uma curva específica.

$$[B]_{(n+1)x2} = [J(t)]_{mx(n+1)}^{-1} [P(t)]_{mx2} \quad (2.14)$$

$$[J(t)]_{(n+1)xm}^T [P(t)]_{mx2} = [J(t)]_{(n+1)xm}^T [J(t)]_{mx(n+1)} [B]_{(n+1)x2} \quad (2.15)$$

Ao final obtém-se,

$$[B]_{(n+1)x2} = \left[[J(t)]_{(n+1)xm}^T [J(t)]_{mx(n+1)} \right]^{-1} [J(t)]_{(n+1)xm}^T [P(t)]_{mx2} \quad (2.16)$$

A equação fornecida por MOHEBBI (2014), conforme apresentada na Equação (2.16), pode ser empregada para obter os pontos de controle necessários para gerar a geometria desejada da seção da pá. Esses pontos geométricos serão otimizados de acordo com os objetivos a serem alcançados. Retornando à Equação 2.10, os pontos B_i do aerofólio otimizado podem ser utilizados para recriar a seção da pá e, posteriormente, compará-los com a forma original.

Apesar de a equação produzir os pontos de controle desejados, é importante ressaltar que isso não resulta em uma solução única, podendo gerar uma resposta que não atende completamente aos requisitos de um problema de otimização. Uma abordagem comum é empregar um algoritmo de otimização, fixando a posição em um dos eixos, o que foi necessário para o problema proposto DA S. NETO *et al.* (2017).

Frequentemente, as coordenadas do eixo x do ponto de controle são fixadas, utilizando-se, por exemplo, o algoritmo de enxame de partículas para encontrar os valores de y que melhor descrevem o perfil desejado. Essa abordagem é comumente adotada quando é necessário ou desejável manter alguns dos pontos de controle fixos.

Capítulo 3

Método Proposto

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia desenvolvida neste trabalho para a otimização de aerofólios com o objetivo de melhorar o desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas. Inicialmente, são descritos os fundamentos teóricos que embasam as técnicas de otimização adotadas, abordando os métodos e ferramentas computacionais empregados. Em seguida, é feita explicação detalhada dos parâmetros e critérios utilizados para guiar o processo, destacando as etapas do fluxo de trabalho, conforme ilustrado na Figura 3.1. Essa metodologia foi cuidadosamente estruturada para garantir que cada fase do processo de otimização seja executada de maneira sistemática e eficiente, assegurando a obtenção de resultados confiáveis e relevantes para o contexto proposto.

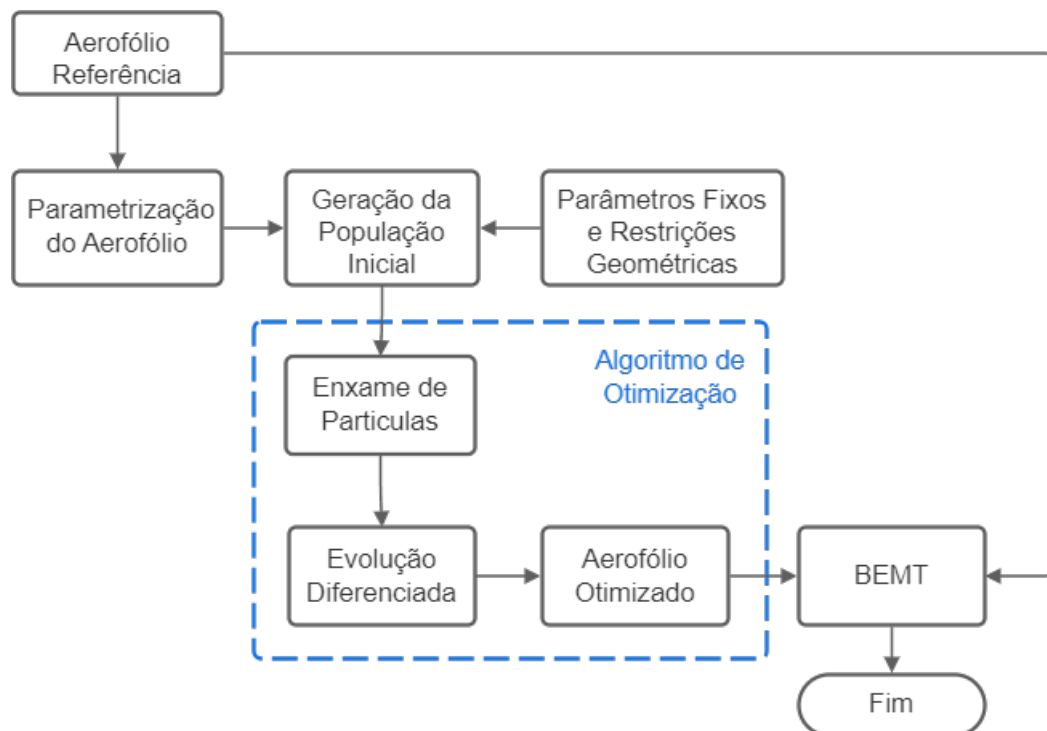


Figura 3.1: Fluxograma. Fonte: Autor

3.1 Análise Aerodinâmica Computacional

Embora a análise aerodinâmica computacional não esteja explicitamente representada no fluxograma, ela desempenha um papel crucial em vários tópicos cujas metodologias ainda serão apresentadas. Em projetos de otimização de aerofólios, a utilização de dados experimentais pode ser desafiadora. Isso ocorre porque, durante o processo de otimização, surgem novos aerofólios para os quais não há dados experimentais disponíveis.

Nessas situações, para obter análises aerodinâmicas, recorre-se frequentemente a soluções computacionais. Contudo, o uso de ferramentas de Fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) apresenta um custo elevado, tanto em termos de recursos computacionais quanto financeiros. Essas soluções de alta precisão geralmente exigem tempo considerável de processamento, o que pode ser inviável em projetos de otimização que necessitam de respostas rápidas.

Para contornar essas limitações, opta-se frequentemente por métodos de análise de menor precisão, mas que oferecem rapidez de execução. Um dos softwares amplamente utilizados para esse propósito é o XFOIL SHARMA *et al.* (2021). Embora originalmente não tenha sido desenvolvido para aerofólios de turbinas eólicas nem para altos números de Reynolds, o XFOIL pode ser adaptado para tais aplicações por meio de modificações e ajustes específicos, conforme discutido por HANSEN (2018).

Embora existam outras opções para a análise aerodinâmica, como o RFOIL, estas tendem a oferecer menor flexibilidade em termos de personalização e ajustes. Além disso, o uso mais frequente do XFOIL na literatura permite um acesso mais amplo a modificações e otimizações já documentadas, facilitando a adaptação do software para as necessidades específicas desta dissertação. Assim, por meio de ajustes e otimizações cuidadosas, foi possível configurar o software de modo a atender às necessidades deste trabalho, garantindo uma aplicação consistente ao longo de todo o processo de otimização e resultados confiáveis para a análise aerodinâmica dos aerofólios.

3.1.1 Função Objetivo

A função objetivo do algoritmo de otimização desenvolvido nesta dissertação baseia-se predominantemente no uso do XFOIL, devido ao seu amplo uso para análises aerodinâmicas com eficiência computacional e capacidade de fornecer resultados rápidos. Essa ferramenta desempenha um papel central ao avaliar o desempenho aerodinâmico dos aerofólios gerados durante o processo de otimização, fornecendo métricas fundamentais como os coeficientes de sustentação (C_l) e de arrasto (C_d), bem como a razão $\frac{C_l}{C_d}$, que representa a eficiência aerodinâmica do perfil avaliado.

O fluxograma apresentado na Figura 3.2 ilustra de forma clara as etapas envol-

vidas na avaliação da função objetivo. Ele inicia com os pontos de controle, que são os parâmetros usados para definir a geometria parametrizada do aerofólio. Esses pontos são convertidos em coordenadas cartesianas na etapa intitulada "Geometria do Aerofólio", que descreve completamente a superfície do perfil aerodinâmico. Nessa etapa, é criado um arquivo contendo as coordenadas do perfil, estruturado no formato esperado pelo XFoil.

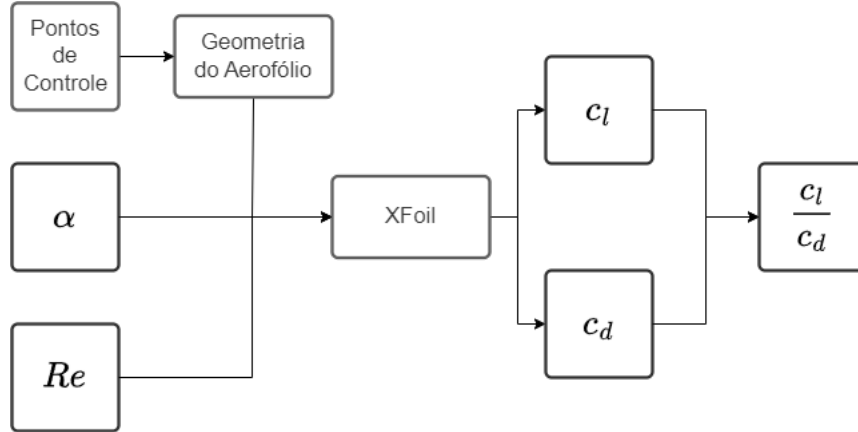


Figura 3.2: Fluxograma da função objetivo. Fonte: Autor

Com a geometria definida, as condições operacionais, como a faixa de ângulo de ataque (α) e o número de Reynolds (Re), são introduzidas como variáveis de entrada. Esses parâmetros representam os cenários operacionais nos quais o aerofólio será avaliado. A partir dessas informações, o XFoil é executado para realizar os cálculos aerodinâmicos, fornecendo como saídas as métricas necessárias para a otimização: C_l e C_d ao longo da faixa de ângulos fornecida. A partir desses valores, é realizada uma etapa adicional para calcular a razão $\frac{C_l}{C_d}$, que é uma métrica fundamental para a avaliação da eficiência aerodinâmica dos aerofólios.

De forma geral, o fluxograma reflete a integração eficiente entre a parametrização da geometria do aerofólio e as análises aerodinâmicas conduzidas pelo XFoil, garantindo um equilíbrio entre precisão e custo computacional. Essa abordagem permite explorar de forma robusta o espaço de soluções e otimizar os aerofólios para atender às exigências específicas de desempenho e operação. A utilização do XFoil como base para a função objetivo assegura resultados consistentes, além de permitir ajustes e adaptações que tornam o processo de otimização mais ágil e eficaz.

3.2 Aerofólio de Referência

Conforme ilustrado na Figura 3.1, a primeira fase do processo de otimização consiste na seleção de um aerofólio de referência. Considerando o objetivo de aprimorar a eficiência de turbinas eólicas *offshore*, optou-se por utilizar um aerofólio prove-

niente de uma turbina de referência da NREL de 5 MW, conforme apresentado por JONKMAN *et al.* (2009). O aerofólio escolhido desempenhará um papel crucial no desenvolvimento da estrutura do otimizador, funcionando como uma base sólida sobre a qual todas as metodologias e parâmetros serão definidos. A escolha deste aerofólio de referência não apenas orienta o ajuste inicial do processo de otimização, mas também estabelece um padrão que assegura a consistência e a eficácia das otimizações subsequentes do projeto.

Embora o aumento da eficiência aerodinâmica de um aerofólio seja uma meta fundamental na otimização de turbinas eólicas, é importante destacar que essa melhoria não se traduz automaticamente em um aumento proporcional na produção de energia. Um aerofólio mais eficiente pode, de fato, reduzir o arrasto e aumentar a sustentação, mas isso pode também resultar em uma maior perda de energia para a esteira gerada ao passar pelo aerogerador. Esse fenômeno, pode reduzir a quantidade de energia disponível para as turbinas situadas a jusante e, em última análise, comprometer a eficiência global do parque eólico BURTON *et al.* (2001).

No contexto de turbinas eólicas, as pás costumam ser compostas por múltiplos aerofólios, levantando a questão de como otimizar o desempenho sem a necessidade de modificar a geometria de todos os perfis aerodinâmicos. Embora seja uma indagação válida, a estratégia adotada neste trabalho visa aumentar a produção de energia por meio da otimização de parte dos aerofólios, proporcionando uma abordagem mais focalizada e eficiente. Buscando identificar a melhor abordagem para garantir que a otimização em desenvolvimento alcance seu objetivo final, é essencial analisar cuidadosamente cada etapa do processo.

Para garantir que o algoritmo de otimização desenvolvido neste trabalho seja eficaz, a estruturação inicial é baseada em um aerofólio específico, escolhido de forma criteriosa. A escolha do aerofólio se fundamentou em princípios físicos, com foco na ponta da pá, que está situada a uma maior distância do cubo (*hub*), como mostrado na Figura 3.3. Essa região é de extrema importância para a geração de energia, pois os valores de torque são significativamente maiores. Portanto, a opção por um aerofólio dessa seção é estrategicamente vantajosa, dado o seu impacto direto e substancial na performance geral da turbina BURTON *et al.* (2001); TIMMER e BAK (2023).

Com base nas informações apresentadas, o aerofólio escolhido para o desenvolvimento do trabalho será o NACA 64-618, pertencente ao aerogerador NREL de 5 MW, exemplificado pela Figura 3.4. Este será, portanto, o ponto de referência apresentado no fluxograma, representando assim o objeto de estudo nesta dissertação.

É importante destacar que a região destacada pela figura não é constituída apenas pelo NACA 64-618, mas também pelos aerofólios DU 93W210 LM e DU 93W250 LM, que também podem ser visualizados na Figura 3.4. A escolha do NACA 64-618

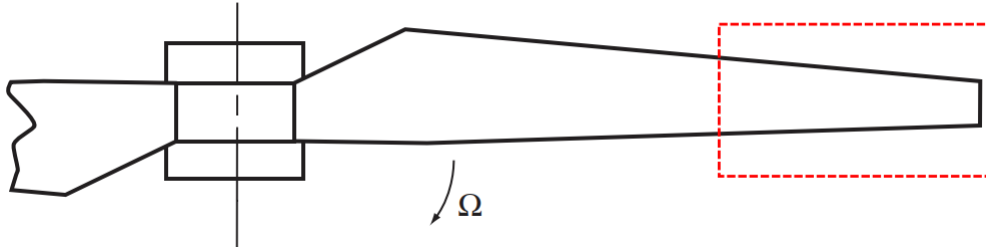


Figura 3.3: Aproximação da região a ser otimizada. Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

se deve ao fato de que ele está localizado na ponta da pá do aerogerador, uma área crítica para a eficiência do sistema, além de possuir coeficientes aerodinâmicos mais proeminentes, tornando-o ideal para os objetivos de otimização propostos.

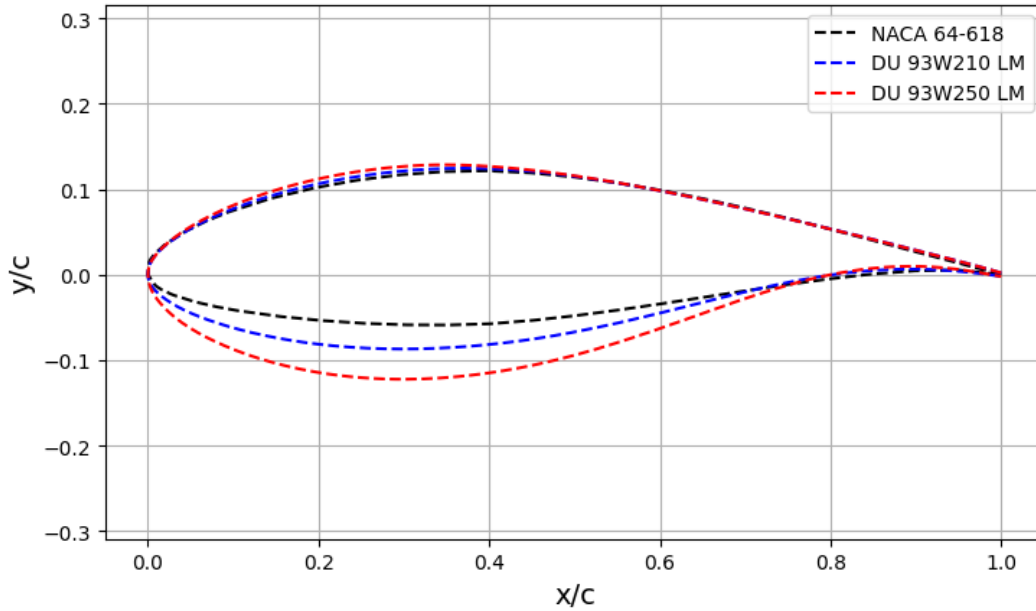


Figura 3.4: Aerofólios localizados na ponta da pá. Fonte: Adaptado de JONKMAN *et al.* (2009)

3.3 Parametrização do Aerofólio

A parametrização da geometria é um passo crucial em um projeto de otimização de aerofólios, pois permite reduzir significativamente a quantidade de pontos a serem otimizados, mantendo a integridade das características aerodinâmicas essenciais. Utilizando as premissas já apresentadas nos capítulos anteriores, o objetivo é simplificar a descrição dos perfis aerodinâmicos sem perder informações relevantes. Para essa tarefa, foram escolhidas as Curvas de Bézier, uma vez que permitem representar uma geometria com um número reduzido de pontos de controle, mantendo

a precisão necessária.

Embora seja possível definir livremente a quantidade de pontos de controle para descrever um aerofólio, é fundamental encontrar um equilíbrio. Um número muito pequeno de pontos pode resultar em uma parametrização de baixa resolução, prejudicando a qualidade da representação geométrica. Por outro lado, um número excessivo de pontos diminui a eficiência da otimização, eliminando o principal benefício da parametrização. Considerando esses aspectos, optou-se por utilizar 6 pontos de controle para descrever cada superfície do perfil aerodinâmico, com base no trabalho de RIBEIRO *et al.* (2012).

Como cada aerofólio é composto pelo intradorso e pelo extradorso, conforme ilustrado na Figura 3.5, essa abordagem resulta em um total de 12 pontos de controle para descrever a geometria completa. Esse número é significativamente menor comparado às quantidades típicas de coordenadas encontradas em aerofólios convencionais, proporcionando uma parametrização mais eficiente. Com essa definição, o próximo passo foi determinar quais seriam esses 12 pontos que melhor descreveriam a geometria desejada, utilizando a Equação 2.16 apresentada no Capítulo 2. O resultado obtido mostrou uma excelente aproximação ao aerofólio original, garantindo a precisão necessária para os estudos subsequentes.

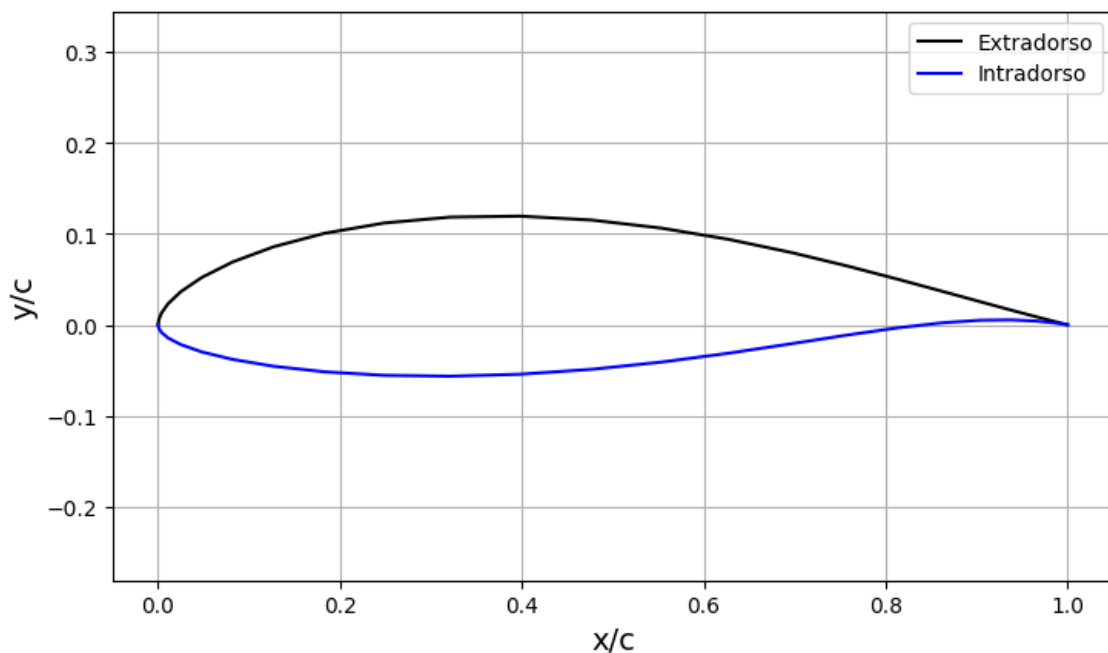


Figura 3.5: Exemplificação da geometria básica de um aerofólio. Fonte: Autor

Durante as análises preliminares, foi constatada certa dificuldade na convergência do Xfoil ao utilizar o produto gerado pelos pontos de controle definidos. Esse problema ocorria devido a um entrelaçamento das linhas que formavam o bordo de ataque durante o processo de desparametrização, que transforma os 12 pontos de

controle em centenas de pontos cartesianos. Embora esse entrelaçamento fosse praticamente imperceptível em análises de erro absoluto e apenas visível ao aplicar um grande zoom na região afetada, ele causava problemas significativos na convergência do XFoil.

Ao investigar mais a fundo, foi identificado que o entrelaçamento das linhas ocorria porque as coordenadas x dos pontos de controle nessa região eram negativas, o que resultava em um formato geométrico incorreto para o aerofólio. Esse comportamento indicou que a Equação 2.16, utilizada inicialmente para definir a posição dos pontos de controle, não oferecia restrições adequadas para evitar esse problema. Diante dessa situação, foi necessário buscar uma nova abordagem para assegurar a precisão geométrica.

A solução adotada envolveu a imposição de restrições nas coordenadas x dos pontos de controle e a aplicação de um algoritmo de otimização de enxame de partículas para determinar os valores ideais das coordenadas y , de forma a ajustar a curva da geometria desejada. As coordenadas x dos pontos de controle foram definidas com base nas posições usadas por RIBEIRO *et al.* (2012), enquanto os valores iniciais para as coordenadas y foram obtidos através da Equação 2.16.

Após a implementação dessa estratégia, chegou-se a uma parametrização que não apenas descreve com precisão o aerofólio, mas também permite a obtenção de seus coeficientes aerodinâmicos de forma computacional, utilizando o XFoil. Esse processo estabeleceu um método robusto para a parametrização de todos os aerofólios abordados no trabalho, assegurando a consistência e eficácia da análise aerodinâmica.

3.4 População Inicial e suas Restrições

De forma geral, os métodos de otimização heurística, como o algoritmo de evolução diferenciada, dependem de um conjunto inicial de dados para iniciar o processo de busca por soluções ótimas. Neste caso, esse conjunto é conhecido como população inicial, que representa diferentes configurações dos aerofólios a serem analisados. Para a presente pesquisa, os pontos de controle que definem a geometria do aerofólio NACA 64-618 serão utilizados como base para gerar os N indivíduos que compõem essa população inicial.

A geração desses novos pontos de controle segue uma abordagem semelhante àquela proposta por RIBEIRO *et al.* (2012). O método consiste em introduzir uma variação aleatória nas coordenadas y dos pontos de controle originais do NACA 64-618, permitindo que cada ponto de controle se desloque positiva ou negativamente em relação ao seu valor inicial. É importante destacar que as coordenadas x dos pontos de controle permanecem inalteradas durante este processo. Essa estratégia

de variação, focada apenas nas coordenadas y , visa explorar o espaço de design de forma eficaz, mantendo a forma geral do aerofólio enquanto se busca otimizar seu desempenho aerodinâmico.

Para garantir que as variações permaneçam dentro de limites razoáveis e para evitar a geração de perfis aerodinâmicos que sejam impraticáveis para construção, é imposto um limite máximo de variação de 10% em relação ao valor inicial de cada ponto de controle RIBEIRO *et al.* (2012). Essa restrição é essencial para assegurar uma convergência mais eficiente do processo de otimização, evitando que a geometria do aerofólio se afaste drasticamente do perfil original e, assim, mantendo características construtivas viáveis, o que poderia resultar em desafios adicionais.

3.5 Algoritmo de Otimização

Com a população inicial devidamente criada e os limites geométricos estabelecidos, avança-se para a fase de implementação do algoritmo de otimização. O objetivo da otimização é encontrar o melhor desempenho aerodinâmico possível para os aerofólios, levando em consideração critérios, como: a maximização do coeficiente de sustentação e a minimização do coeficiente de arrasto. Esse algoritmo, composto pelos métodos de Evolução Diferenciada e Enxame de Partículas, desempenhará um papel crucial na busca por soluções otimizadas, ajustando a forma do aerofólio para alcançar os melhores resultados. Nessa etapa, é imperativo desenvolver as rotinas e integrá-las, além de também definir os parâmetros e constantes essenciais para o correto funcionamento, garantindo que a otimização seja realizada de forma eficiente e eficaz.

Nessa etapa, as definições anteriores serão concatenadas de maneira a integrar a metodologia de otimização. Contudo, resta definir o objetivo específico da otimização, ou seja, qual melhoria nos coeficientes aerodinâmicos está sendo buscada por meio das variações geométricas. Conforme mencionado anteriormente, optou-se por selecionar perfis da parte final da pá da turbina eólica. Nessa região, um dos parâmetros críticos é a eficiência aerodinâmica (C_l/C_d), tornando-se o ponto focal desta otimização. O intuito é maximizar essa eficiência, visto que ela desempenha um papel crucial no desempenho geral do aerofólio. Portanto, ao direcionar os esforços de otimização para aprimorar o equilíbrio entre sustentação e arrasto, espera-se alcançar ganhos significativos na eficiência aerodinâmica, contribuindo para o sucesso do projeto de otimização BURTON *et al.* (2001); TIMMER e BAK (2023).

3.5.1 Metodologia Híbrida

A otimização proposta neste trabalho será realizada por meio de um método híbrido, que combina dois algoritmos heurísticos distintos. Este método utiliza as vantagens de cada algoritmo para explorar eficientemente o espaço de busca e refinar as soluções, promovendo uma otimização mais robusta e eficaz. O fluxograma do funcionamento do algoritmo, pode ser visualizado pela Figura 3.6, que busca explicar como esses algoritmos são integrados e como operam em conjunto para alcançar os objetivos de otimização.

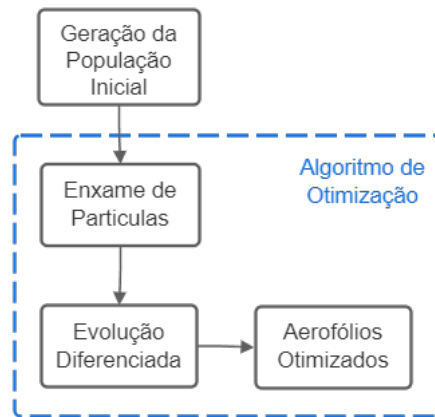


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo híbrido. Fonte: Autor

A metodologia inicia-se com a geração da população inicial, que serve de base para o processo de otimização. Na primeira etapa, é utilizado o algoritmo de Enxame de Partículas, responsável por realizar uma exploração abrangente do espaço de busca global. Este método é eficaz na identificação rápida de regiões promissoras que podem conter soluções ótimas, devido à sua capacidade de varrer vastas áreas do espaço de busca.

Após essa fase inicial, o algoritmo de Evolução Diferenciada é aplicado utilizando a população final gerada pelo Enxame de Partículas como ponto de partida para um refinamento mais detalhado das soluções encontradas. Esse segundo método é particularmente eficaz em ajustar e melhorar as soluções iniciais, concentrando-se nas áreas mais promissoras identificadas na primeira etapa. Assim, o algoritmo de Evolução Diferenciada complementa a busca inicial realizada pelo Enxame de Partículas, proporcionando um maior nível de detalhamento na otimização.

Ambos os algoritmos operam sob dois parâmetros comuns: a quantidade de indivíduos (N) e a quantidade total de iterações (M). O número total de iterações é igualmente distribuído entre os dois métodos, garantindo uma contribuição equilibrada para o processo de otimização. Para esta dissertação, a função objetivo utilizada em ambos os algoritmos para avaliar suas populações é a eficiência aerodinâmica obtida pelo XFoil modificado, que foi previamente discutido e adaptado

para a análise aerodinâmica de aerofólios de turbinas eólicas. Essa abordagem híbrida combina a exploração inicial do espaço de busca pelo Enxame de Partículas e o refinamento das soluções pela Evolução Diferenciada, maximizando a eficiência da otimização dos aerofólios.

3.5.2 Enxame de Partículas

O fluxograma apresentado na Figura 3.7 ilustra o funcionamento do algoritmo de otimização por Enxame de Partículas utilizado nesta dissertação. Este algoritmo é o primeiro a ser aplicado dentro do método híbrido desenvolvido, sendo responsável por iniciar o processo de otimização. Inicialmente, uma população de soluções candidatas, ou partículas, é estabelecida conforme descrito anteriormente, e cada uma dessas partículas representa uma possível configuração do aerofólio. As partículas são então avaliadas com base na sua aptidão, que é determinada pela função objetivo.

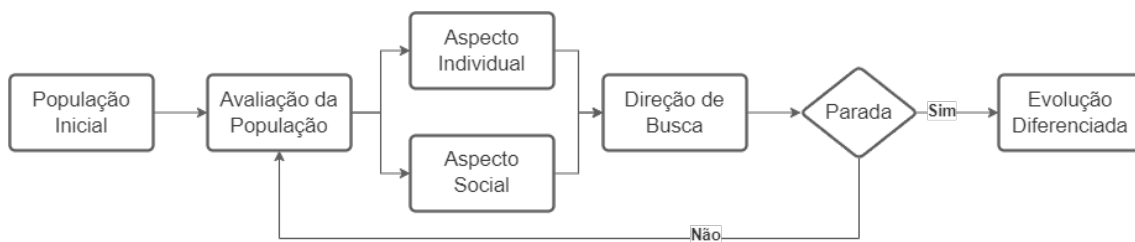


Figura 3.7: Fluxograma do algoritmo para enxame de partículas. Fonte: Autor

A partir dessa avaliação, cada partícula ajusta sua posição no espaço de busca, levando em consideração tanto a sua própria experiência (aspecto individual) quanto a experiência do grupo (aspecto social). O critério de parada é o número de iterações definidas, que corresponde à metade do total de iterações destinadas ao algoritmo híbrido. Após alcançar o número máximo de iterações estabelecido, a população final é então encaminhada para a fase de otimização subsequente, utilizando o método de Evolução Diferenciada.

3.5.3 Evolução Diferenciada

O fluxograma apresentado na Figura 3.8 descreve o funcionamento do algoritmo de Evolução Diferenciada, que é o segundo componente do método híbrido desenvolvido nesta dissertação. Este algoritmo utiliza a população final obtida pelo Enxame de Partículas como ponto de partida para seu processo de otimização. A partir dessa população inicial, o algoritmo realiza operações de seleção e *crossover*, gerando uma nova população a cada iteração.

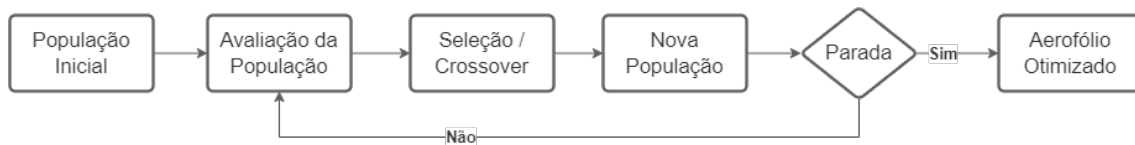


Figura 3.8: Fluxograma do algoritmo para evolução diferenciada. Fonte: Autor

Durante o processo, a seleção da nova população é realizada com base na aptidão dos indivíduos, priorizando aqueles que apresentam melhor desempenho na função objetivo. Essa abordagem assegura que a cada nova iteração sejam mantidos ou introduzidos indivíduos mais aptos, favorecendo a busca pela solução ótima. O critério de parada adotado é o mesmo utilizado anteriormente, sendo baseado na quantidade de iterações previamente definidas, que corresponde à metade do total destinado ao método híbrido completo. Ao término do processo, o algoritmo gera o aerofólio otimizado, representando a solução final do problema de otimização aerodinâmica abordado.

3.5.4 Análise de Convergência

O processo de ajuste desses parâmetros e constantes para o método de otimização apresentado, é guiado por uma análise de convergência, buscando identificar configurações que permitam a convergência eficaz do algoritmo. É necessário avaliar como diferentes combinações desses elementos afetam a capacidade do algoritmo de atingir soluções ótimas de maneira eficiente e estável. Essa análise é crucial para garantir não apenas a eficácia, mas também a robustez do algoritmo diante de diferentes cenários de otimização.

A análise de convergência é realizada estipulando dois parâmetros comuns e de alta relevância para ambos os algoritmos: a quantidade de indivíduos na população e de iterações. Além dos parâmetros comuns, cada algoritmo possui seus parâmetros específicos, cujas definições serão apresentadas em seções posteriores. Assim, foram realizadas todas as combinações possíveis dentro de uma lista de valores para a quantidade de indivíduos e iterações, buscando compreender como essas variáveis impactam o desempenho dos algoritmos.

Como resultado dessa análise, serão obtidos os mínimos encontrados para cada combinação determinada. Isso permitirá identificar qual arranjo desses parâmetros melhor atende ao problema. A partir desse estudo, é possível encontrar a configuração ideal que equilibra o tempo de execução dos algoritmos com a qualidade dos mínimos encontrados. Assim, a análise busca não apenas otimizar o desempenho dos algoritmos, mas também garantir a eficiência computacional ao encontrar soluções que sejam tanto rápidas quanto precisas.

3.5.5 Aerofólios Otimizados

Após o processo de otimização, espera-se obter uma versão aprimorada do aerofólio NACA 64-618, resultando em um aumento significativo na eficiência aerodinâmica. Para evidenciar os ganhos de performance proporcionados por essa otimização, são apresentados gráficos e dados que incluem a polar de arrasto, a eficiência aerodinâmica, bem como a variação dos coeficientes de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque. Esses elementos fornecerão uma visão clara das melhorias alcançadas.

Para validar a eficácia da metodologia utilizada, o mesmo processo de otimização é aplicado às geometrias das pontas de pá DU 93W210 LM e DU 93W250 LM. A aplicação do método a essas diferentes geometrias permite comparar os resultados e avaliar a consistência da melhoria de desempenho obtida.

Com base na resposta da otimização para cada uma dessas geometrias, será realizada uma avaliação detalhada do ganho de performance global do aerogerador. Esta análise permitirá entender como as diferentes configurações de aerofólios afetam o desempenho geral da turbina eólica. A análise geral do uso dessas novas geometrias na turbina eólica e a identificação da configuração mais eficiente serão abordadas de maneira mais detalhada na seção subsequente.

3.5.6 Modelagem Aerogerador

A modelagem de um aerogerador começa pela compreensão de como ele extrai energia do vento, convertendo a energia cinética dos ventos em energia mecânica. Esta energia mecânica é posteriormente transformada em energia elétrica por um gerador, sendo essa a principal forma de utilização em aplicações de produção de eletricidade. O processo de extração de energia envolve a redução da velocidade do vento que chega ao aerogerador, afetando apenas o fluxo de ar que passa pelo atuador da turbina. A eficiência desse processo é fundamental para a conversão eficaz de energia e para o desempenho geral do aerogerador BURTON *et al.* (2001).

A representação gráfica desta modelagem pode ser observada na Figura 3.9, que apresenta o tubo de corrente. Um tubo de corrente é um volume imaginário delimitado por linhas de corrente, que são trajetórias tangentes à velocidade do escoamento em cada ponto. Inicialmente, não consideramos escoamentos perpendiculares aos limites definidos pelo tubo de corrente, o que significa que o fluxo de massa permanece constante ao longo de todo o tubo de corrente. Conforme discutido anteriormente, o aerogerador reduz a velocidade do vento que chega a ele, e de acordo com a conservação da massa, essa redução na velocidade implica que a área do fluxo de ar deve aumentar para acomodar a mesma quantidade de massa de ar em movimento, o que justifica o aumento da área do fluxo após a perda de velocidade causada pelo

atuador. BURTON *et al.* (2001); ANDERSON (2011).

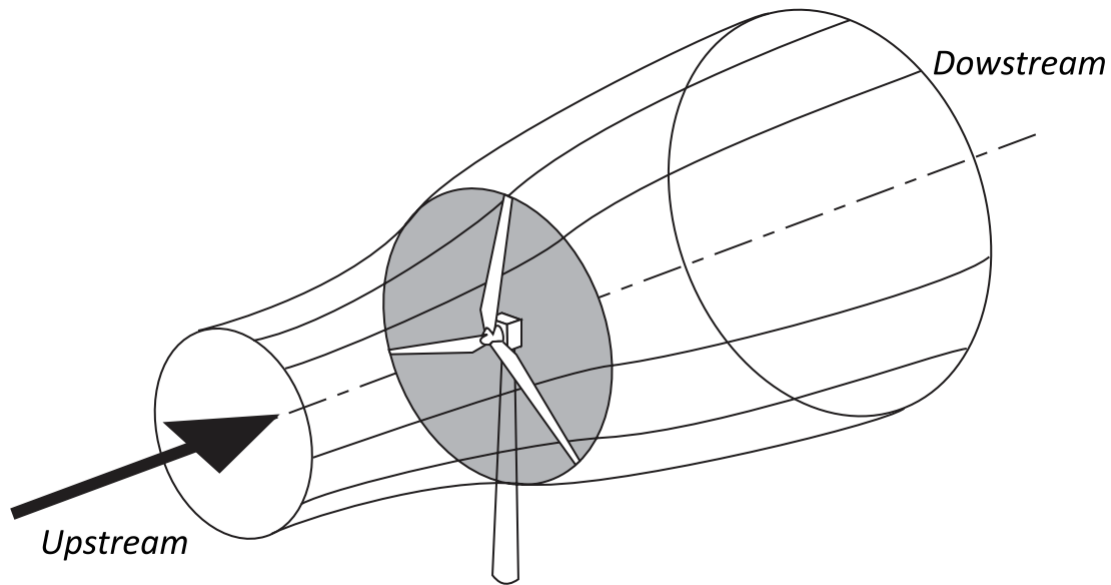


Figura 3.9: Tubo de corrente da extração de energia de uma turbina eólica. Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

Na modelagem, é importante entender que a mudança de velocidade, resultante da conversão de energia, não ocorre de forma abrupta. Além de não ser desejável devido às grandes acelerações envolvidas, uma mudança súbita de velocidade não é possível. O ar que chega ao atuador, *upstream*, desacelera gradualmente, quando atinge o atuador, sua velocidade já é menor do que a velocidade do vento livre, o que provoca uma leve expansão no tubo de corrente. Nessa fase, a pressão estática aumenta para compensar a energia cinética perdida.

Quando o ar passa pelo atuador, há uma queda na pressão estática, resultado do design das pás do aerogerador, fazendo com que o ar tenha uma pressão menor que a atmosférica. A região posterior ao atuador, onde a pressão estática e a velocidade do ar são baixas, é conhecida como esteira (*wake*). Na sequência, *downstream*, a pressão aumenta gradualmente até equilibrar-se com a pressão atmosférica. Esse aumento na pressão estática ocorre à custa da energia cinética, causando uma desaceleração adicional do vento. Portanto, entre as condições distantes de *upstream* e *downstream*, não há mudança na pressão estática, mas há uma redução significativa na energia cinética BURTON *et al.* (2001); MANWELL *et al.* (2010).

Teoria do Disco Atuador de Rankine-Froude

O mecanismo descrito acima oferece uma visão geral da conversão da energia cinética dos ventos, mas não aborda de forma detalhada como essa energia é convertida e a quantidade dela que realmente podemos utilizar. Sabe-se, que essa conversão

não é perfeitamente eficiente. Parte da energia cinética é convertida diretamente em energia mecânica utilizável, enquanto outra parte é dissipada como calor devido à resistência aerodinâmica e outros fatores de perda.

Nesta seção, apresentaremos uma análise aerodinâmica do comportamento do fluido sobre uma turbina eólica, focando no processo de extração de energia. Para isso, teremos como objeto central de estudo o Disco Atuador, que representará de maneira genérica as pás de uma turbina eólica. Uma representação esquemática do disco, bem como algumas características dos fluidos apresentadas anteriormente, podem ser observadas na Figura 3.10. Nessa representação, temos U como a velocidade e p como a pressão, cada um associado a um momento durante a passagem do fluido pelo atuador.

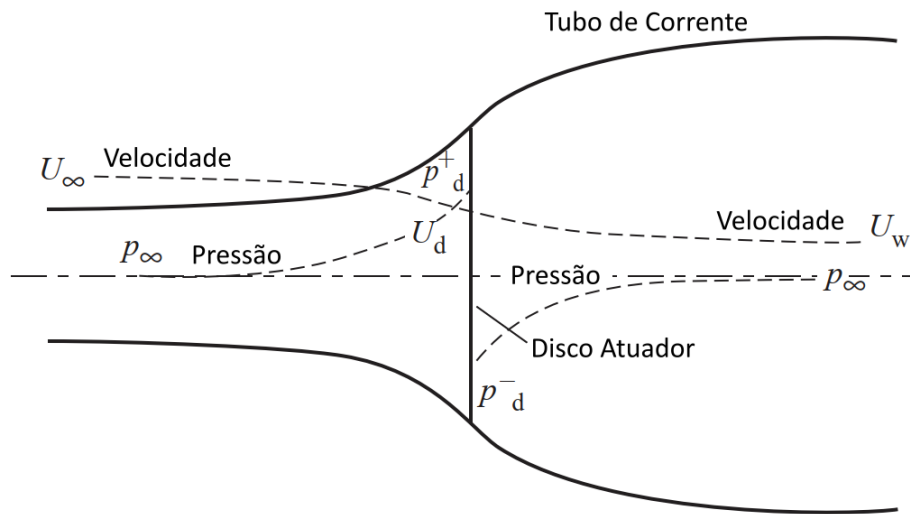


Figura 3.10: Linhas de corrente da extração de energia de uma turbina eólica. Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

Os subscritos utilizados são ∞ para condições em livre corrente (*upstream*), d para condições no disco e w para condições na esteira (*downstream*). Sendo assim, as variáveis U_∞ e p_∞ correspondem aos valores em livre corrente, enquanto U_w e p_w correspondem aos valores na esteira, lembrando que após uma certa distância assumi-se que $p_w = p_\infty$. Além disso, temos as variáveis associadas ao disco atuador (U_d , p_d^+ e p_d^-), onde o foco principal deve estar na diferença de pressão.

A partir de agora, entraremos na modelagem física do comportamento do fluido para este caso. Para isso, devemos apresentar algumas das hipóteses assumidas:

- Fluxo de fluido homogêneo, incompressível e em estado estacionário.
- Sem arrasto por fricção.
- Um número infinito de pás.

- Empuxo uniforme sobre a área do disco ou rotor.
- Esteira não rotativa.
- A pressão estática distante de *upstream* e *downstream* do rotor é igual à pressão estática ambiente não perturbada

Voltando aos conceitos apresentados anteriormente, temos que o sistema obedece à lei de conservação da massa. Com isso, temos o seguinte equacionamento:

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w = \dot{m} \quad (3.1)$$

Após essa primeira associação, pode-se iniciar o entendimento da força resultante desse sistema. O ar que passa através do disco sofre uma mudança geral na velocidade, de U_∞ para U_w . A taxa de variação do momento está associada à mudança entre estas duas velocidades, sendo assim temos:

$$\text{Taxa de variação de } momentum = \dot{m}U_\infty - \dot{m}U_w = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad (3.2)$$

A força que causa essa variação de *momentum* vem integralmente da diferença de pressão entre as duas faces do disco atuador, podendo assim escrever o equacionamento anterior de forma mais completa:

$$F_m = \Delta p A_d = \dot{m}(U_\infty - U_w) \quad (3.3)$$

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad (3.4)$$

Uma das formas mais simples de descrevermos essa diferença de pressão é usando a formulação de Bernoulli, nas duas regiões: upstream e downstream. A equação de Bernoulli estabelece que, sob condições estáveis, a energia total no fluxo, composta por energia cinética, energia de pressão estática e energia potencial gravitacional, permanece constante desde que não haja trabalho realizado sobre ou pelo fluido ANDERSON (2011). Sendo assim temos que:

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{Constante} \quad (3.5)$$

desta maneira,

$$\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2 + p_\infty + \rho_\infty gh_\infty = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ + \rho_d gh_d \quad (3.6)$$

Quando utilizamos esse conceito nas duas regiões demarcadas e sabendo que $\rho_\infty = \rho_d$ e $h_\infty = h_d$, encontramos:

A montante

$$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + p_{\infty+} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^+ \quad (3.7)$$

A jusante ($p_w = p_\infty$)

$$\frac{1}{2}\rho U_w^2 + p_{\infty+} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^- \quad (3.8)$$

Essas equações nos permitem relacionar a diferença de pressão com as velocidades nas diferentes regiões ao redor do disco atuador, facilitando a análise da eficiência de extração de energia do aerogerador. Ao subtrair as Equações 3.7 e 3.8, encontra-se,

$$p_d^+ - p_d^- = \frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2) \quad (3.9)$$

Voltando a Equação 3.4, chega-se a,

$$\frac{1}{2}\rho(U_\infty^2 - U_w^2)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad (3.10)$$

Utilizando essa formulação simples, e realizando uma simplificação na formulação acima chega-se a um resultado interessante, qual seja, mostra-se que a velocidade no disco é a média entre as velocidades em *upstream* e *downstream*, conforme mostra o equacionamento abaixo.

$$U_d = \frac{U_\infty + U_w}{2} \quad (3.11)$$

Ao longo desta modelagem, serão apresentados diversos fatores relevantes. O primeiro a ser introduzido é o fator de indução de fluxo axial, denotado por a . Este fator é fundamental para entender a influência do aerogerador no fluxo de ar que o atravessa. Assumindo que seu valor máximo é 1, o fator de indução axial a é definido como a diminuição fracionária na velocidade do vento entre a corrente livre e o plano do rotor. Em termos matemáticos, temos:

$$a = \frac{U_\infty - U_d}{U_\infty} \quad (3.12)$$

Este fator nos permite quantificar a redução na velocidade do vento devido à presença do rotor, sendo crucial para a análise da eficiência da extração de energia pela turbina eólica. Desta maneira, podemos relacionar todas as velocidades presentes

no sistema.

$$U_d = (1 - a)U_\infty \quad (3.13)$$

$$U_w = (1 - 2a)U_\infty \quad (3.14)$$

Com isso, pode-se concluir que metade da perda de velocidade axial ocorre antes (upstream) e a outra metade ocorre a depois (downstream) do disco atuador. Ao combinar as Equações 3.4 e 3.13, encontra-se,

$$F_m = (p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1 - a) \quad (3.15)$$

Simplificando,

$$F_m = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \quad (3.16)$$

A equação encontrada acima representa a força concentrada no disco atuador. Para calcular a potência extraída por essa força, utiliza-se a taxa de trabalho realizado pela força resultante ($F_m U_d$), chegando na seguinte formulação:

$$\text{Potência} = F_m U_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (3.17)$$

Sabendo que existem perdas durante esse processo, é importante buscar maneiras de entender a eficiência da conversão de energia, desta maneira utiliza-se o coeficiente de potência (C_p), que é a relação entre a potência extraída pela turbina e a potência cinética do vento incidente:

$$C_p = \frac{\text{Potência}}{\text{Potência Disponível}} = \frac{2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} \quad (3.18)$$

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.19)$$

Para encontrar o valor máximo de C_p , aplica-se a primeira derivada em relação ao fator a . Isso permite encontrar o valor de a que garante o valor máximo de C_p .

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (3.20)$$

Sendo assim ao o valor máximo ocorre quando $a = \frac{1}{3}$.

$$C_{p_{max}} = 4 \left(\frac{1}{3} \right) \left(1 - \left(\frac{1}{3} \right) \right)^2 = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (3.21)$$

Esse resultado introduz o conhecido limite de Betz, que é o limite teórico máximo de eficiência para a extração de energia de um fluxo de vento. Segundo o limite de

Betz, o coeficiente de potência máximo teoricamente possível que uma turbina eólica pode atingir é aproximadamente 0,593. Esse limite ocorre quando a velocidade do vento após passar pela turbina é reduzida a um terço da velocidade do vento livre, ou seja, $a = \frac{1}{3}$.

Também pode-se adimensionalizar a equação da força axial causada pela diferença de pressão apresentada, Equação 3.16, com isso tem-se o coeficiente de tração (C_t), descrito pela equação abaixo.

$$C_t = \frac{2\rho A_d U_\infty^2 a(1-a)}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d} \quad (3.22)$$

$$C_t = 4a(1-a) \quad (3.23)$$

A Figura 3.11 apresenta a variação dos coeficientes de potência (C_p) e de tração (C_t) em função do fator de indução axial (a). É importante destacar que o método do disco atuador possui limitações evidentes, especialmente para valores de $a \geq 0.5$. Nessa faixa, a velocidade da esteira (*wake*) fica nula ou negativa, o que não é fisicamente realista e compromete a eficiência do modelo. Essas limitações ressaltam a necessidade de considerar outros métodos ou ajustes no modelo para situações em que o fator de indução axial seja elevado.

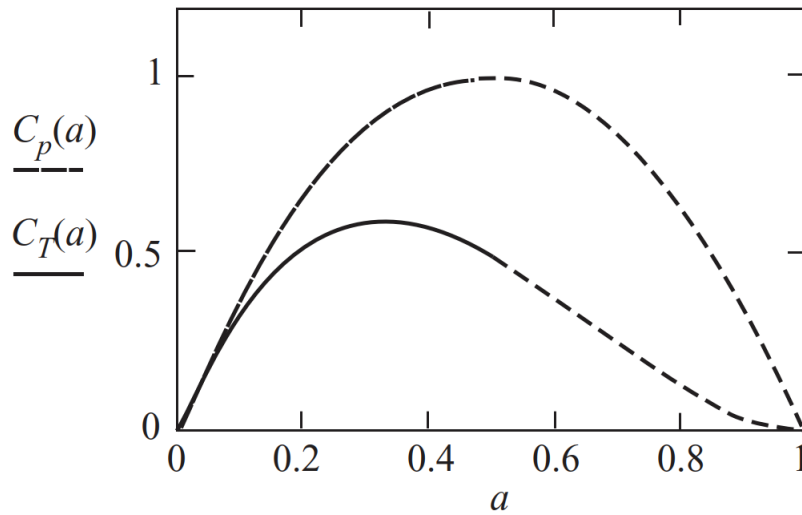


Figura 3.11: Variação de C_p e C_t com Fator de indução axial (a). Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

Teoria do Disco Atuador Considerando a Rotação da Esteira

A modelagem anterior foi desenvolvida analisando apenas o momento linear, sem considerar a rotação da corrente de ar. No entanto, para uma análise mais com-

pleta e realista, é necessário considerar que o rotor da turbina eólica possui rotação, gerando um momento angular significativo. Quando o ar passa pelo rotor em rotação, ele não só desacelera, como também começa a girar em uma direção oposta à rotação do rotor, um efeito conhecido como torque de reação. Esse comportamento é ilustrado na Figura 3.12, onde a introdução da rotação adiciona complexidade ao modelo, exigindo a consideração da conservação do momento angular além do linear BURTON *et al.* (2001); MANWELL *et al.* (2010).

Essa rotação impacta diretamente a eficiência do aerogerador, pois altera a distribuição de velocidades e pressões ao longo do fluxo. O fluido rotacionado indica a transferência de energia cinética do vento para a energia mecânica rotacional do rotor, que é convertida em energia elétrica. Incluir a rotação na análise permite otimizar o design das pás do rotor para maximizar a extração de energia do vento. Assim, ao desenvolver um modelo que considera tanto o momento linear quanto o angular, podemos prever com maior precisão o desempenho das turbinas eólicas, identificando áreas para melhorias e otimizações.

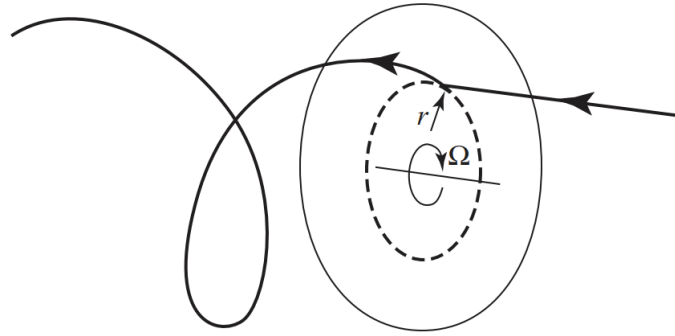


Figura 3.12: Trajetória de uma partícula de ar passando pelo disco do rotor. Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

O fluxo que entra no disco atuador não possui movimento rotacional, mas adquire rotação ao atravessar o disco, mantendo essa rotação constante à medida que avança pela esteira, como representado pela Figura 3.12. A transferência de movimento rotacional para o ar ocorre através da espessura do disco, onde a variação na velocidade tangencial é expressa pelo fator de indução de fluxo tangencial, a' , como indica a Figura 3.13. Antes do disco, a velocidade tangencial é zero, enquanto após o disco, a velocidade tangencial é $2\Omega ra'$. No meio da espessura do disco, a uma distância radial r do eixo de rotação, a velocidade tangencial induzida é $\Omega ra'$.

O fator de indução de fluxo tangencial (a'), representa a fração da velocidade angular adquirida pelo fluxo de ar ao atravessar o disco atuador e a velocidade angular do rotor, ou seja, expressa a mudança na velocidade rotacional do ar induzida pela rotação do rotor.

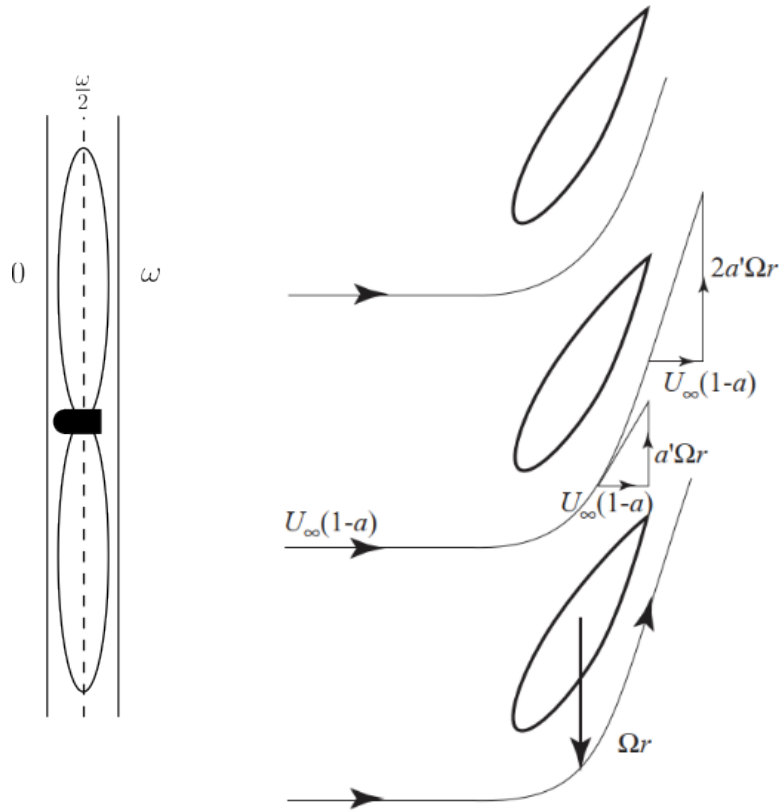


Figura 3.13: Crescimento de velocidade tangencial ao longo da espessura do disco.
Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (3.24)$$

O fluxo acelera na direção tangencial à medida que é comprimido entre as pás, especialmente perto da raiz, onde o bloqueio sólido apresentado pelas pás é maior. A velocidade tangencial e a velocidade axial induzida podem variar com a posição radial. Para analisar essas variações, considera-se um anel anular do disco do rotor com raio r e largura radial dr , conforme apresentado na Figura 3.14, sendo está um esquemático para a modelagem do problema.

Ao utilizar um volume de controle que se move com a velocidade angular das pás, podemos aplicar a equação de energia nas seções antes e depois das pás para derivar uma expressão que descreve a diferença de pressão através delas, desta maneira pode-se chegar ao empuxo (força concentrada no atuador) para o caso atual. Ou seja, utilizando a formulação de Bernoulli, de forma semelhante ao caso anterior, chega-se a diferença de pressão desejada, crucial para entender a dinâmica do fluxo de ar em torno do rotor, a formulação destacada por ver observada abaixo. Vale ressaltar que ao longo a passagem do fluxo de ar pelo disco, a velocidade angular do ar relativa às pás aumenta de Ω para $\Omega + \omega$, enquanto o componente axial da velocidade permanece constante.

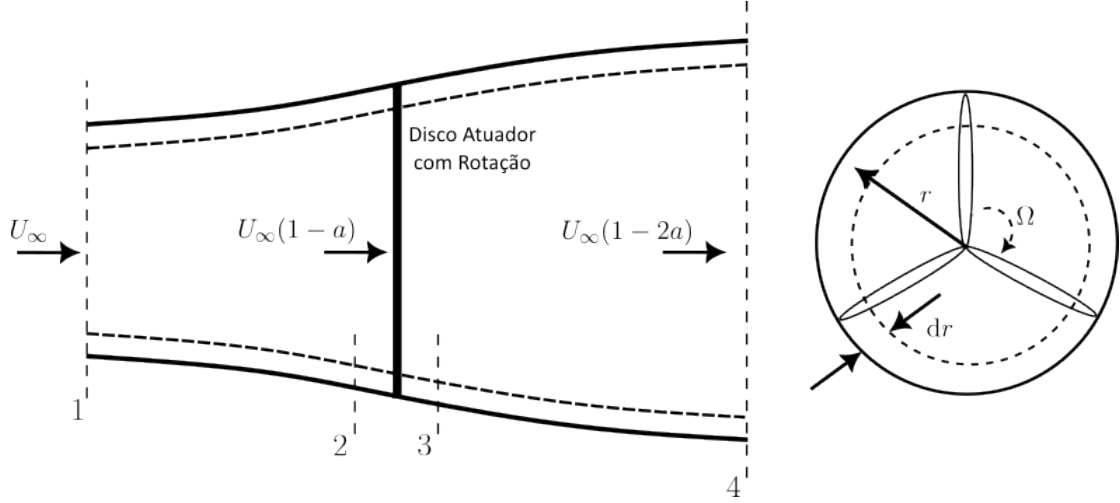


Figura 3.14: Geometria para análise do rotor. Fonte: Adaptado de MANWELL *et al.* (2010)

$$\frac{1}{2}\rho V_2^2 + p_2 = \frac{1}{2}\rho V_3^2 + p_3 \quad (3.25)$$

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_3^2) \quad V_2 = \Omega r \quad V_3 = (\Omega + \omega)r \quad (3.26)$$

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho((\Omega r)^2 - ((\Omega + \omega)r)^2) \quad (3.27)$$

Com isso,

$$p_2 - p_3 = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^2 \quad (3.28)$$

Sabendo-se que a força concentrada no atuador é calculado pela diferença de pressão em uma determinada área, ao reduzirmos essa área a um anel anular (dA_d), chega-se a seguinte formulação.

$$dT = (p_2 - p_3)dA_d = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr \quad \therefore \quad dA_d = 2\pi r dr \quad (3.29)$$

Simplificando,

$$dT = 2a'(1 - a')\rho\Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (3.30)$$

Durante a avaliação anterior, chegou-se a uma formulação para o empuxo analisando apenas o momento linear associado ao problema, representado pela Equação 3.16. Ao passar a equação para sua forma diferencial e igualando com a Equação 3.30, tem-se o seguinte resultado.

$$dT = 2a(1 - a)\rho U_\infty^2 2\pi r dr \quad \rightarrow \quad \text{Momentum} \quad (3.31)$$

$$dT = 2a'(1 - a')\rho\Omega^2 r^2 2\pi r dr = 2a(1 - a)\rho U_\infty^2 2\pi r dr \quad (3.32)$$

A partir desse equacionamento, define-se um novo parâmetro conhecido como razão de velocidade local (*Local Speed Ratio*, λ_r). Esse termo varia de acordo com a posição no raio do rotor, porém quando este é igual a R , o parâmetro passa a ser razão de velocidade na ponta (*tip speed ratio*, λ).

$$\frac{a(1 - a)}{a'(1 - a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U_\infty^2} = \lambda_r^2 \quad (3.33)$$

$$\frac{\Omega R}{U_\infty} = \lambda \quad \therefore \quad \frac{\Omega r}{U_\infty} = \frac{\lambda r}{R} = \lambda_r \quad (3.34)$$

O torque gerado pelo rotor de uma turbina eólica será calculado considerando o momento de inércia, o que facilita a compreensão da transferência de energia do vento para a turbina. O torque em um anel específico do rotor é determinado pela taxa de variação do momento angular do ar que passa por esse anel. As equações relevantes para este cálculo são apresentadas a seguir.

$$\begin{aligned} I = mr^2 & \rightarrow \text{Momento de Inercia de um Anel} \\ L = I\omega & \rightarrow \text{Momento Angular} \\ Q = \frac{dL}{dt} & \rightarrow \text{Torque} \end{aligned}$$

Sendo assim,

Torque (Q) = vazão de massa x mudança de velocidade tangencial x raio

$$Q = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt} r^2 \omega \quad (3.35)$$

Logo,

$$dQ = \rho dA_d U_\infty (1 - a) 2\Omega a' r^2 \quad (3.36)$$

O torque de acionamento no eixo do rotor é dQ , resultando em um incremento na potência de saída do eixo do rotor, dP . Esse incremento de potência é obtido integrando o trabalho realizado pelo torque ao longo de um pequeno deslocamento angular, chegando na formulação abaixo.

$$dP = dQ\Omega = \rho dA_d U_\infty (1 - a) 2\Omega^2 a' r^2 \quad (3.37)$$

A potência total extraída do vento ao reduzir sua velocidade é determinada pela

taxa de variação do momento linear axial, conforme apresentado na Equação 3.17. Com isso, pode-se utilizar a Equação 3.37 de potência, que define a potência em função do momento angular, e então igualá-la à taxa de variação do torque obtida pela Equação 3.17. Esse processo permite buscar por novas relações, conforme apresentado abaixo.

$$\begin{aligned} 2\rho dA_d U_\infty^3 a(1-a)^2 &= \rho dA_d U_\infty (1-a) 2\Omega^2 a' r^2 \\ U_\infty^2 a(1-a) &= \Omega^2 a' r^2 \\ \frac{U_\infty^2 r^2}{\Omega^2} &= \frac{a(1-a)}{a'} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Pela relação apresentada pela Equação 3.33, chega-se a seguinte relação,

$$\lambda_r^2 = \frac{a(1-a)}{a'} \quad \therefore \quad \lambda_r^2 a' = a(1-a) \quad (3.39)$$

A partir disso, e sabendo que a área anelar $dA_d = 2\pi r dr$, pode-se reestruturar a Equação 3.37 de maneira a chegar no seguinte equacionamento.

$$dP = \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 2\pi r dr \right) 4a'(1-a)\lambda_r^2 = \frac{1}{2} \rho A_d U_\infty^3 \left[\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (3.40)$$

Pela equacionamento pode-se perceber que o primeiro termo em parênteses representa o fluxo de potência através do anel, enquanto o termo fora dos colchetes pode corresponder à eficiência do elemento de pá na captura dessa potência. Sendo assim, pode-se assumir que a eficiência do elemento de pá (η_r), pode ser escrito da seguinte forma.

$$\eta_r = 4a'(1-a)\lambda_r^2 \quad (3.41)$$

A partir da Equação 3.40, sabe-se que a quantidade de potência extraída de qualquer anel anular depende dos fatores de indução axial e angular, assim como da razão de velocidade de ponta. Os fatores de indução controlam a intensidade e direção do fluxo de ar, enquanto a razão de velocidade local depende da velocidade de ponta e do raio do rotor. A contribuição incremental para o coeficiente de potência, dC_p , de cada anel anular é expressa pela equação:

$$dC_p = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho A_d U^3} \quad (3.42)$$

Assim, o coeficiente de potência pode ser expresso por:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \quad (3.43)$$

Para obter o resultado da integração é necessário determinar algumas relações. Segundo MANWELL *et al.* (2010) tem-se as seguintes variáveis:

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (3.44)$$

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{1-3a} \quad (3.45)$$

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1}$$

Para concluir, a análise do equacionamento básico da Teoria do Disco Atuador de Rankine-Froude e da Teoria do Disco Atuador Considerando a Rotação da Esteira revela-se fundamental para o entendimento e a aplicação da teoria do momento sobre o elemento de pá. Essas abordagens teóricas não apenas elucidam os mecanismos de interação entre o fluxo de ar e as lâminas dos rotores, mas também estabelecem uma base robusta para a modelagem precisa do desempenho de turbinas eólicas e outras máquinas rotativas. A integração desses conceitos é essencial para impulsionar inovações na engenharia aeroespacial e em sistemas de energias renováveis, promovendo avanços que visam aumentar a eficiência e a sustentabilidade das tecnologias contemporâneas. Aprofundar-se nessas teorias é, portanto, um passo crucial para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e ambientalmente responsáveis.

Teoria do Momento sobre o Elemento de Pá (BEMT)

A Teoria do Momento sobre o Elemento de Pá (*Blade Element Momentum Theory*, BEMT) é uma metodologia consagrada e amplamente utilizada na análise e no projeto de turbinas eólicas. Ela combina a conservação do momento linear e angular com as características aerodinâmicas de cada seção da pá, fornecendo uma ferramenta robusta para prever o desempenho aerodinâmico. A principal premissa do BEMT é a divisão da pá da turbina em seções discretas (ou elementos), de forma que as forças atuantes sobre cada elemento possam ser analisadas de maneira independente, levando em consideração os perfis aerodinâmicos locais e a interação do fluxo de ar com a geometria da pá BURTON *et al.* (2001); MANWELL *et al.* (2010); INGRAM (2011). Essa abordagem simplificada permite um cálculo eficiente das forças e momentos ao longo da pá, sendo de extrema importância no desenvolvimento e otimização de projetos de turbinas eólicas. A Figura 3.15 ilustra a estrutura típica de um elemento de pá em uma turbina eólica.

Os principais pressupostos do BEMT incluem:

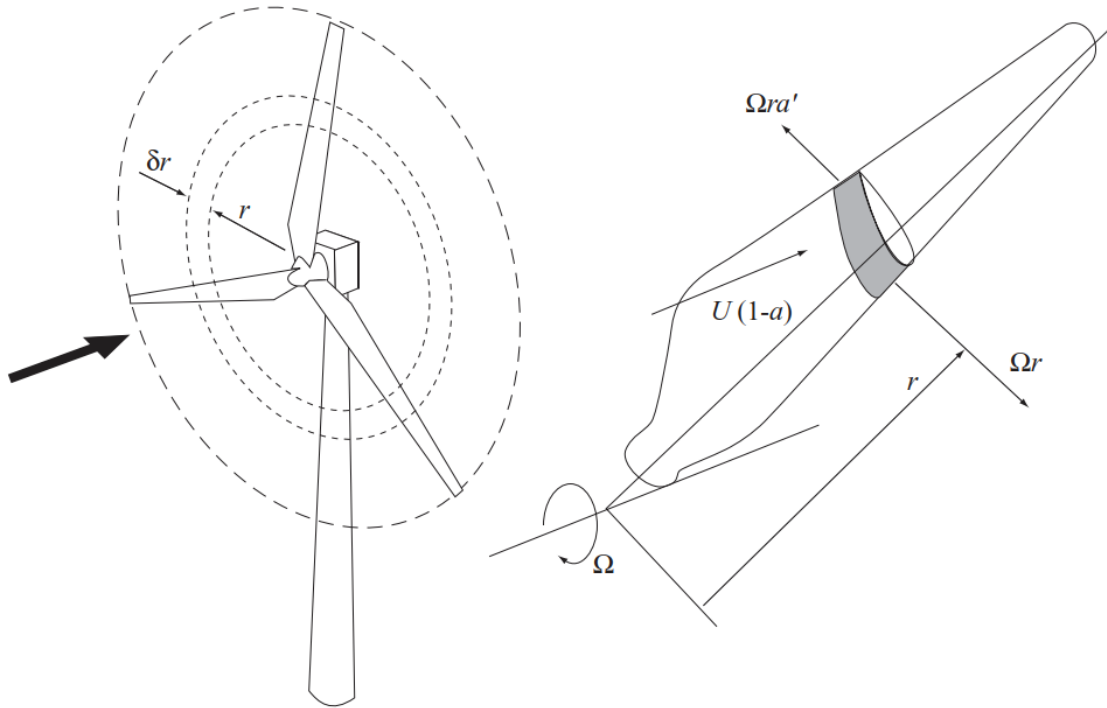


Figura 3.15: Exemplificação de um elemento de pá. Fonte: BURTON *et al.* (2001)

- **Isolamento entre Elementos:** Cada elemento da pá é tratado como uma seção independente das demais, sem interferência aerodinâmica entre os elementos vizinhos.
- **Forças Dependentes do Perfil Aerodinâmico:** As forças de sustentação e arrasto em cada elemento são determinadas pelos coeficientes aerodinâmicos do aerofólio local, que variam com o ângulo de ataque e a velocidade relativa do vento.

Com esses pressupostos, assume-se que as forças aerodinâmicas em um elemento de pá podem ser calculadas com base nas características bidimensionais do aerofólio, levando em consideração o ângulo de ataque e a velocidade incidente sobre cada seção. As velocidades ao longo da pá são determinadas pela combinação da velocidade axial do vento e pela velocidade rotacional do rotor.

O cálculo das forças que atuam nas pás é baseado na integração dos incrementos de momento linear e angular ao longo da extensão radial da pá. As equações de momento linear e angular governam a distribuição de força ao longo do raio da pá e são derivadas diretamente das leis de conservação de momento. O momento linear refere-se à transferência de energia e impulso axial do vento para o rotor, enquanto o momento angular está relacionado à rotação induzida no fluxo de ar pela interação com as pás.

A equação que descreve o incremento diferencial de força de tração (dT) devido

ao momento linear, é dada pela forma diferencial da Equação 3.16:

$$dT = \rho U^2 4a(1-a) r dr \quad (\text{Momento Linear}) \quad (3.46)$$

Nessa equação, ρ é a densidade do ar, U é a velocidade do vento livre, a é o fator de indução axial que representa a desaceleração do vento ao passar pelas pás, r é a posição radial ao longo da pá, e dr é o incremento radial. A equação demonstra que a força de tração gerada em cada elemento é proporcional ao quadrado da velocidade do vento e é modulada pelo fator de indução axial, que varia ao longo do raio da pá.

O momento angular, que descreve o torque gerado pelas pás devido à rotação induzida no fluxo de ar, é expresso pela forma ampliada da Equação 3.36:

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U r^3 \Omega dr \quad (\text{Momento Angular}) \quad (3.47)$$

Aqui, a' é o fator de indução angular, que reflete a rotação induzida no ar pelo movimento da turbina, Ω é a velocidade angular do rotor, r^3 indica a dependência cúbica do torque com a posição radial ao longo da pá, e os demais termos seguem as mesmas definições da equação de momento linear. O torque gerado por cada elemento de pá é, portanto, influenciado tanto pela rotação do rotor quanto pelo fator de indução angular, que depende da interação aerodinâmica com o fluxo de ar.

Essas equações expressam o empuxo (dT) e o torque (dQ) gerados em cada elemento da pá. Sua integração ao longo de todo o raio da pá permite determinar o empuxo total e o torque total gerados pela turbina. A figura 3.16 apresenta diagramas ilustrando as componentes de velocidade e as forças atuantes em um elemento de pá, ajudando a visualizar a dinâmica das interações aerodinâmicas em uma turbina eólica.

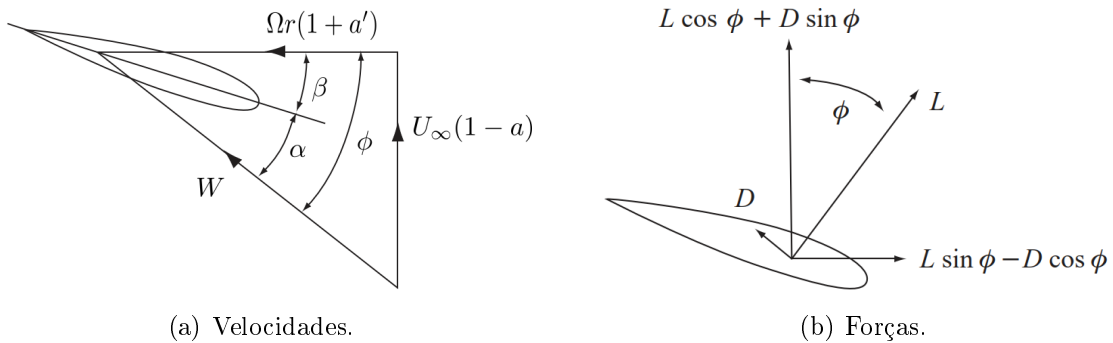


Figura 3.16: Diagrama das forças e velocidades em um elemento de pá. Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

Em termos práticos, a teoria BEMT permite calcular tanto o torque quanto a força de empuxo gerados pela interação do fluxo de ar com as pás, baseando-se nos fatores de indução a e a' . Essa abordagem segmentada oferece uma metodologia

eficiente para a otimização do desempenho aerodinâmico das pás, permitindo prever a contribuição de cada elemento ao desempenho global da turbina. Isso facilita o ajuste de parâmetros de projeto, como o comprimento da corda, o ângulo de passo e a rotação do rotor, para maximizar a potência extraída do vento e minimizar as perdas aerodinâmicas.

Considerando uma turbina com N pás, cada uma com raio de ponta R , corda c e ângulo de passo (*Pitch*) θ , o comprimento da corda e o ângulo de *pitch* podem variar ao longo da pá. Supondo que as pás girem com velocidade angular Ω e que a velocidade do vento seja U_∞ , a velocidade tangencial do elemento de pá, combinada com a velocidade induzida pela esteira ($a'\Omega r$), resulta na velocidade tangencial líquida $(1 + a')\Omega r$ experimentada pelo elemento. A velocidade relativa resultante na pá pode ser calculada como:

$$U_{\text{rel}} = \sqrt{U_{\text{axial}}^2 + U_{\text{rot}}^2} \quad (3.48)$$

onde $U_{\text{axial}} = U_\infty(1 - a)$ é a componente axial da velocidade relativa, e $U_{\text{rot}} = \Omega r(1 + a')$ é a componente rotacional. A soma vetorial dessas velocidades resulta no fluxo incidente sobre o aerofólio, determinando o ângulo de indução φ , o qual define o ângulo de ataque da pá.

A determinação do ângulo de ataque de cada elemento de pá, é essencial para calcular as forças de sustentação (L) e arrasto (D) que atuam sobre ele. São forças perpendiculares e paralelas, respectivamente, à velocidade relativa no referencial do aerofólio.

A relação entre as componentes de velocidade axial e rotacional é expressa como:

$$\tan \varphi = \frac{U_\infty(1 - a)}{\Omega r(1 + a')} \quad (3.49)$$

A velocidade relativa total, então, pode ser obtida como:

$$U_{\text{rel}} = \frac{U_\infty(1 - a)}{\sin \varphi} \quad (3.50)$$

As forças de sustentação e arrasto que atuam em um elemento de pá são dadas por:

$$dF_L = \frac{1}{2}C_L\rho U_{\text{rel}}^2 c dr, \quad dF_D = \frac{1}{2}C_D\rho U_{\text{rel}}^2 c dr \quad (3.51)$$

Estas forças podem ser decompostas em componentes normais e tangenciais ao plano de rotação, que influenciam o torque e a força axial da turbina. A força normal dF_N e a força tangencial dF_T são determinadas pelas expressões:

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi, \quad dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (3.52)$$

Considerando que o rotor é composto por B pás, a força tangencial total é dada por:

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c dr \quad (3.53)$$

O torque gerado pelo rotor pode ser expresso como:

$$dT = Br dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c r dr \quad (3.54)$$

Substituindo a expressão para U_{rel} e definindo os coeficientes de força normal e tangencial C_n e C_t , temos:

$$C_n = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi, \quad C_t = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \quad (3.55)$$

As expressões finais para a força normal e o torque podem ser reescritas como:

$$dF_N = \sigma' \pi \rho \frac{U_\infty^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} C_n r dr \quad (3.56)$$

$$dT = \sigma' \pi \rho \frac{U_\infty^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} C_t r^2 dr \quad (3.57)$$

Aqui, o fator de solidez local σ' é dado por:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.58)$$

Dessa forma, as forças aerodinâmicas que atuam nas pás equilibram a queda de pressão e a rotação da esteira, garantindo a eficiência no processo de troca de momento axial e angular.

Correção de Prandtl e seu Impacto nas Pás do Aerogerador

Em turbinas eólicas, a diferença de pressão entre as superfícies superior (extradorso) e inferior (intradorso) de uma pá gera circulação de ar em torno de suas extremidades. Isso faz com que o fluxo de ar tenda a contornar a ponta da pá, reduzindo o efeito de sustentação naquela região. Esse fenômeno também ocorre perto do centro do rotor, onde a área do cubo não contribui para a geração de sustentação. Tanto nas extremidades das pás quanto na região central, esses efeitos são

influenciados pelo número de pás e afetam significativamente a eficiência da turbina, reduzindo a potência gerada.

A forma mais eficiente de levar em consideração esses efeitos na Teoria de Momento de Elemento de Pás é pela aplicação do fator de correção de Prandtl, que ajusta o cálculo do desempenho das pás para incluir as perdas causadas nas pontas e no cubo.

Para representar esse ajuste nas pontas das pás, o fator de correção f_p é expresso por:

$$f_p = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{-\frac{B}{2} \left(\frac{R-r}{r} \right)} \sqrt{1 + \frac{\lambda_r^2}{(1-a)^2}} \right] \quad (3.59)$$

onde B é o número de pás, R o raio externo do rotor, r a posição do elemento de pá, e λ_r é o fator de velocidade relativa.

Para corrigir o efeito na região do cubo, utiliza-se o fator f_c , definido como:

$$f_c = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{-\frac{B}{2} \left(\frac{r-r_0}{r} \right)} \sqrt{1 + \frac{\lambda_r^2}{(1-a)^2}} \right] \quad (3.60)$$

Aqui, r_0 é o raio do cubo, e os demais termos seguem as mesmas definições da equação anterior. Esses dois fatores, f_p para as pontas e f_c para o cubo, ajustam as perdas associadas a cada uma dessas regiões.

O fator de correção total F , que incorpora as perdas em ambas as áreas, é dado pelo produto dos dois fatores:

$$F = f_c f_p \quad (3.61)$$

Esse fator total F é então aplicado nas equações de empuxo e torque para ajustar a potência e o desempenho da turbina. O empuxo dE , corrigido pelo fator de Prandtl, pode ser calculado da seguinte forma:

$$dE = 4Fa(1-a)\rho U^2 \pi r dr \quad (3.62)$$

E o torque dT se ajusta conforme a expressão:

$$dT = 4Fa'(1-a)\rho U \Omega \pi r^3 dr \quad (3.63)$$

Essas correções são essenciais para estimar com precisão a eficiência do aerogerador, pois levam em conta os efeitos tridimensionais que ocorrem nas extremidades das pás e no cubo do rotor.

Cálculo da Potência do Aerogerador

Ao aplicar o fator de Prandtl, as expressões de empuxo dE e torque dT corrigidas pela BEMT permitem determinar o desempenho do aerogerador. Para isso, precisamos resolver as equações de indução axial a e indução angular a' .

A relação entre a indução axial a e o coeficiente de força normal C_n pode ser expressa como:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma' C_n}{4F \sin^2 \varphi} \quad (3.64)$$

Onde σ' representa a razão de área das pás e φ é o ângulo de indução. Isolando a , obtemos a seguinte equação:

$$a = \left(\frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma' C_n} + 1 \right)^{-1} \quad (3.65)$$

Já para o fator de indução angular a' , temos a seguinte relação, em termos do coeficiente de arrasto C_t :

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{\sigma' C_t}{4F \sin^2 \varphi} \quad (3.66)$$

Substituindo o fator de velocidade relativa λ_r a partir da equação de velocidade, podemos simplificar a expressão para a' como:

$$a' = \left(\frac{4F \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma' C_t} - 1 \right)^{-1} \quad (3.67)$$

Essas equações permitem calcular os fatores de indução axial e angular iterativamente, a partir de parâmetros geométricos da pá e dos coeficientes aerodinâmicos dos aerofólios. Dessa forma, é possível calcular o empuxo, torque e, conseqüentemente, a potência gerada pelo aerogerador sob diferentes condições de operação.

Correção de Glauert

A BEMT apresenta limitações quando o fator de indução axial a ultrapassa 0,4, especialmente em condições de alta relação de velocidade na ponta. Nesse cenário, o rotor entra no estado de esteira turbulenta (*turbulent wake*), onde $a > 0.5$. De acordo com a teoria de momentum, esse estado indica uma reversão do fluxo na esteira distante, o que viola os pressupostos básicos da teoria BEMT JONKMAN *et al.* (2015).

Para contornar essa limitação, Glauert (1926) desenvolveu uma correção empírica ao coeficiente de empuxo C_T , que ajusta a contribuição do empuxo para rotores operando em regimes de alta indução axial. O coeficiente de empuxo C_T é definido

como:

$$C_T = \frac{\sigma(1-a)^2 c_n}{\sin^2(\varphi)} \quad (3.68)$$

onde T é o empuxo gerado pelo rotor, ρ é a densidade do ar, U é a velocidade do vento a montante e A é a área varrida pelo rotor.

Quando o fator de indução a excede certos limites, a correção de Glauert se torna necessária. Além disso, a correção de Glauert é aplicada em conjunto com o fator de perdas F , como modificado por Buhl (2004), resultando na seguinte equação para o fator de indução:

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \quad (3.69)$$

Aqui, F representa o fator de perdas na ponta da pá, e a equação resolve o fator a considerando tanto a correção de Glauert quanto as perdas na ponta. Essa abordagem evita instabilidades numéricas e melhora a precisão da previsão do empuxo quando o fator a é elevado, garantindo assim um modelo aerodinâmico mais robusto para condições de esteira turbulenta.

3.5.7 Algoritmo de Desempenho

O algoritmo de desempenho utilizado neste trabalho é baseado na Teoria do Momento do Elemento de Pá, amplamente empregada para analisar o comportamento aerodinâmico de turbinas eólicas, o que permite a comparação de diferentes configurações. Antes de realizar a comparação entre os aerogeradores, é feita uma validação do código desenvolvido, utilizando dados e resultados presentes na literatura. Esse processo é essencial para assegurar a precisão e confiabilidade do algoritmo.

Após a validação, o algoritmo será aplicado para comparar o desempenho dos aerogeradores, analisando o coeficiente de potência em diferentes razões de velocidade (*Tip-Speed Ratios* - TSR), denotado por λ , e avaliando a produção de energia no ponto de maior eficiência. Essa comparação proporcionará uma análise detalhada das melhorias implementadas, permitindo avaliar de forma robusta a eficácia do método proposto.

Antes de realizar as comparações entre as turbinas, o algoritmo desenvolvido passou por um processo de validação utilizando exemplos disponíveis na literatura. Essa etapa foi essencial para assegurar que o modelo implementado estivesse em conformidade com resultados já consolidados e aceitos na comunidade científica.

Com o algoritmo validado, foi possível realizar análises comparativas para avaliar as soluções desenvolvidas e identificar a configuração mais otimizada. As avaliações incluíram a comparação do coeficiente de potência (C_p) para diferentes razões de

velocidade e a análise do torque gerado, utilizando gráficos para visualização dos resultados. Além disso, foram consideradas variáveis como a rotações por minuto (RPM) e a produção de energia. Essas análises proporcionam uma compreensão detalhada do desempenho dos aerogeradores, permitindo identificar qual configuração oferece maior eficiência e aproveitamento energético.

Estrutura Iterativa do Algoritmo

O algoritmo segue um processo iterativo detalhado, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3.17, que permite determinar com precisão os parâmetros aerodinâmicos e de desempenho de uma turbina eólica. O processo começa com a inicialização dos fatores de indução axial a e tangencial a' , utilizando valores padrão iniciais. A partir desses valores, o ângulo de incidência φ é calculado, sendo este um parâmetro essencial para determinar o ângulo de ataque α .

Com o ângulo de ataque definido, entram em cena os coeficientes aerodinâmicos, como o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto, que podem ser obtidos através de simulações (como no XFOil) ou de dados experimentais. Esses coeficientes são utilizados no cálculo das forças atuantes sobre cada elemento da pá, separadas em forças normais e tangenciais. Para ajustar esses cálculos às condições reais da turbina, utiliza-se o fator de correção de Prandtl, representado no fluxograma como uma combinação dos fatores F_p e F_c , resultando em F , que corrige as forças calculadas considerando o efeito de ponta de pá.

O próximo passo envolve o cálculo do coeficiente de empuxo C_T , que é crucial para determinar se a iteração seguirá por um caminho mais simples ou por uma correção não linear mais complexa. Dependendo do valor de C_T , o fator de indução axial a é atualizado de duas maneiras distintas, conforme detalhado no fluxograma, garantindo maior precisão nos cálculos sob diferentes condições operacionais.

Após a atualização de a , o fator de indução tangencial a' também é recalculado. Em seguida, o algoritmo verifica o critério de convergência, baseado na diferença máxima ($E_{\max}$) entre os valores de a e a' nas iterações subsequentes, ou seja, avalia a variação dos fatores em cada iteração. Caso a diferença seja inferior a um valor de tolerância predefinido, o algoritmo conclui que os resultados convergiram.

Finalmente, após atingir a convergência, o algoritmo realiza o cálculo do torque e da potência gerada pela turbina eólica. Esses resultados são obtidos considerando os valores finais de a e a' , além de parâmetros físicos como a densidade do ar e a velocidade angular da turbina. A Figura 3.17 ilustra todas essas etapas, guiando o usuário através de decisões-chave e cálculos envolvidos no processo de simulação da performance de uma turbina eólica usando a BEMT.

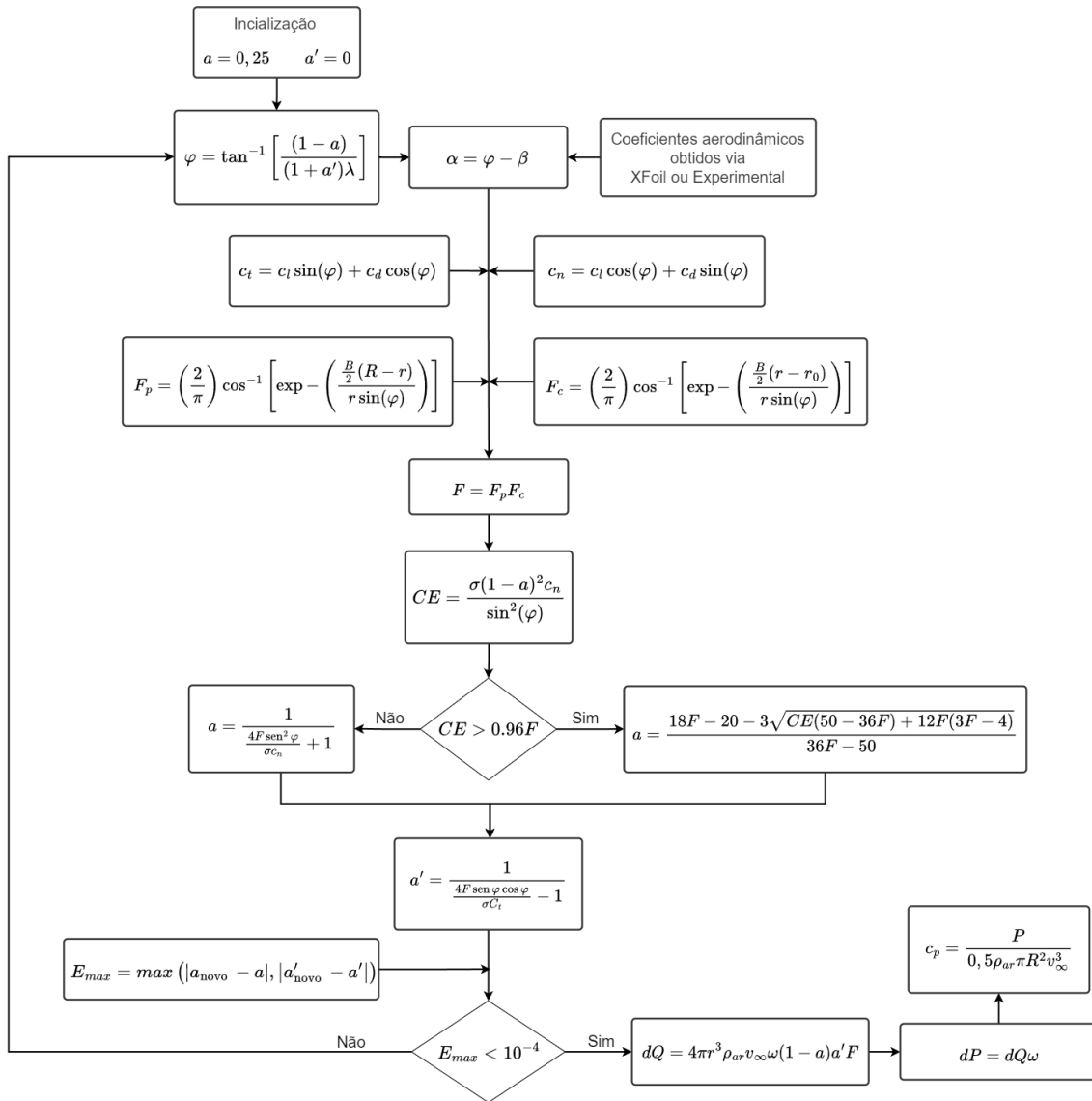


Figura 3.17: Fluxograma do algoritmo BEMT desenvolvido. Fonte: Autor

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a otimização de perfis aerodinâmicos de turbinas eólicas *offshore*, com o objetivo de ajustar suas geometrias e aprimorar seu desempenho. O processo é dividido nas seguintes etapas: validação do algoritmo de desempenho, definição da função objetivo, avaliação da parametrização, otimização das geometrias e, por fim, análise e avaliação dos resultados.

4.1 Validação do Algoritmo BEMT

Para avaliar o desempenho de um aerogerador, existem diversas abordagens, muitas das quais envolvem alto custo computacional. Nesse contexto, optou-se por desenvolver um algoritmo de rápida execução utilizando a teoria *Blade Element Momentum*. O código foi elaborado com base nas informações fornecidas por BURTON *et al.* (2001) e JONKMAN *et al.* (2015). Contudo, para utilizá-lo nesta dissertação, é realizada uma validação comparativa entre os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido e aqueles disponíveis na literatura.

4.1.1 Exemplo da Literatura

Primeiramente, o algoritmo proposto será avaliado diante de um resultado de torque por unidade de envergadura, apresentado por BURTON *et al.* (2001). A Tabela 4.1 apresenta as principais informações geométricas da turbina para essa primeira avaliação. Vale ressaltar que as pás são compostas pelos aerofólios: NACA-63212, NACA-63215, NACA-63218, NACA-63221 e NACA-63225.

Um dos resultados fundamentais fornecidos por BURTON *et al.* (2001) são os torques por unidade de envergadura, os quais são categorizados por *Tip-Speed Ratio* (λ). Na avaliação preliminar, a eficácia do código para esse tipo de resultado é examinada, e posteriormente, uma nova avaliação é conduzida para cenários distintos.

Tabela 4.1: Projeto de pá de um rotor com diâmetro de 17 metros. Fonte: Adaptado de BURTON *et al.* (2001)

Raio r (mm)	$\mu = r/R$	Corda c (mm)	Pitch β (graus)	Razão espessura/ corda (%)
1700	0,20	1085	15,0	24,6
2125	0,25	1045	12,1	22,5
2550	0,30	1005	9,5	20,7
2975	0,35	965	7,6	19,5
3400	0,40	925	6,1	18,7
3825	0,45	885	4,9	18,1
4250	0,50	845	3,9	17,6
4675	0,55	805	3,1	17,1
5100	0,60	765	2,4	16,6
5525	0,65	725	1,9	16,1
5950	0,70	685	1,5	15,6
6375	0,75	645	1,2	15,1
6800	0,80	605	0,9	14,6
7225	0,85	565	0,6	14,1
7650	0,90	525	0,4	13,6
8075	0,95	485	0,2	13,1
8500	1,00	445	0,0	12,6

Na Figura 4.1, os resultados da literatura, denominados WEH (*Wind Energy Handbook*), são comparados com os resultados do algoritmo, identificado como *BEMT Module*. É importante ressaltar que, nessa fase inicial, foram utilizados coeficientes aerodinâmicos experimentais, conforme descritos por BURTON *et al.* (2001).

Com base na análise da Figura 4.1, conclui-se que os resultados obtidos pelo *BEMT Module* demonstram uma boa aproximação para diversos valores de *Tip-Speed Ratio*. No entanto, em algumas situações, observa-se uma divergência nas seções iniciais da pá, o que não caracteriza uma baixa performance. Por esse motivo, será realizada uma avaliação dos valores de erros médios. Além disso, novas validações serão conduzidas em etapas subsequentes para fortalecer a análise e aprimorar os resultados.

A menor precisão no cálculo do torque próximo ao hub do aerofólio pode ser atribuída à ausência de referências específicas e informações detalhadas sobre essa geometria na literatura. A falta de dados suficientes limita a capacidade de fazer estudos precisos, exigindo o uso de aproximações e, conseqüentemente, afetando a precisão geral nessa região.

A interpretação visual, embora útil, pode levar a conclusões equivocadas. Por essa razão, a Tabela 4.2 apresenta os valores do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), calculados

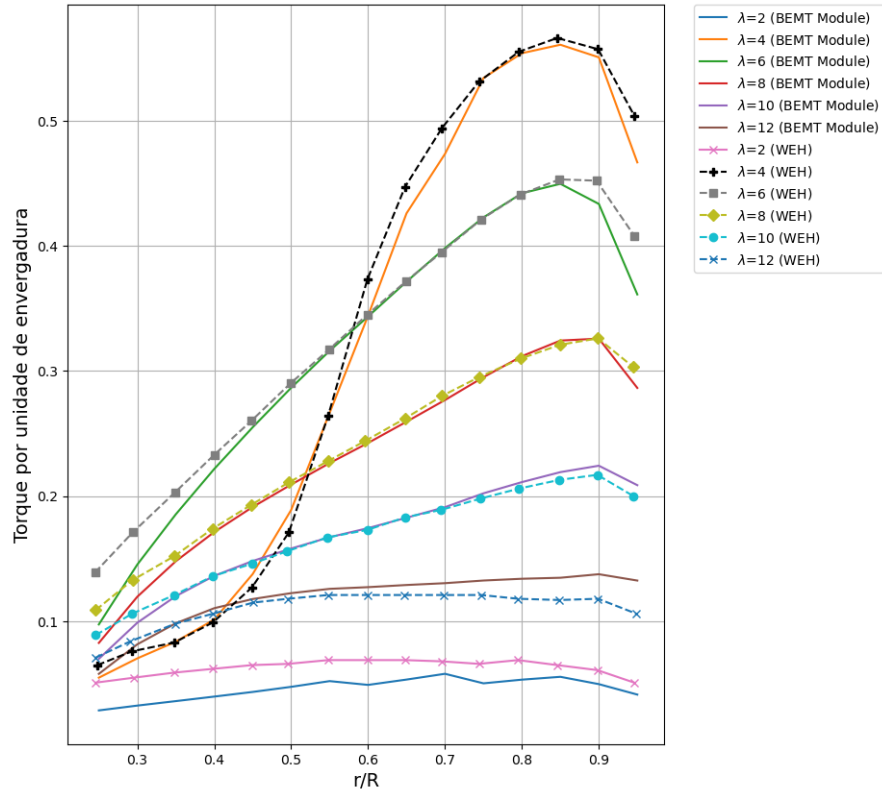


Figura 4.1: Comparação dos resultados de torque apresentados por BURTON *et al.* (2001). Fonte: Autor

para diferentes valores de *Tip-Speed Ratio*. Esses erros foram determinados a partir das diferenças entre as coordenadas cartesianas originais do aerofólio e aquelas obtidas após a parametrização. Assim, cada ponto parametrizado foi comparado com o correspondente no aerofólio original, permitindo uma análise objetiva baseada em métricas quantitativas em vez de percepções visuais. Os resultados apresentados na tabela indicam baixos valores de erro, evidenciando que o algoritmo é eficaz em realizar aproximações precisas, assegurando a fidelidade da parametrização ao formato original do aerofólio.

Tabela 4.2: Erros encontrados para diferentes valores de Tip-Speed Ratio. Fonte: Autor

Tip-Speed Ratio (λ)	MAE	RMSE	MAPE
2	0,0168	0,018	27,13
4	0,0116	0,016	4,86
6	0,0122	0,019	5,34
8	0,0054	0,009	3,37
10	0,0045	0,007	3,29
12	0,0098	0,012	9,04

4.1.2 Turbina Eólica 5MW NREL

Por fim, foi adotada uma referência da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para uma turbina eólica *offshore* de 5 MW. Essa referência foi desenvolvida para auxiliar estudos conceituais que visam avaliar a tecnologia eólica *offshore*, que é o principal foco desta dissertação. As principais características geométricas que compõem a turbina, podem ser visualizadas na Tabela 4.3. Além disso, o relatório da NREL fornece informações sobre as características geométricas das pás e apresenta alguns resultados relevantes para a turbina em questão, como pode ser observado na Tabela 4.4.

Tabela 4.3: Distribuição da pá do aerogerador 5MW NREL. Fonte: Adaptado de JONKMAN *et al.* (2009)

Raio r (m)	$\mu = r/R$	Corde c (m)	Pitch β (graus)	Aerofólio
2,8667	0,0465	3,542	13,308	Circular
5,6000	0,0908	3,854	13,308	Circular
8,3333	0,1352	4,167	13,308	Circular 2
11,7500	0,1906	4,557	13,308	DU 93W405 AD
15,8500	0,2571	4,652	11,480	DU 93W350 AD
19,9500	0,3236	4,458	10,162	DU 93W350 AD
24,0500	0,3902	4,249	9,011	DU 93W300 LM
28,1500	0,4567	4,007	7,795	DU 93W250 LM
32,2500	0,5232	3,748	6,544	DU 93W250 LM
36,3500	0,5897	3,502	5,361	DU 93W210 LM
40,4500	0,6563	3,256	4,188	DU 93W210 LM
44,5500	0,7228	3,010	3,125	NACA 64618
48,6500	0,7893	2,764	2,319	NACA 64618
52,7500	0,8558	2,518	1,526	NACA 64618
56,1667	0,9113	2,313	0,863	NACA 64618
58,9000	0,9556	2,086	0,370	NACA 64618
61,6333	1,00	1,419	0,106	NACA 64618

Tabela 4.4: Dados Turbina Eólica 5MW NREL. Fonte: Adaptado de JONKMAN *et al.* (2009)

Dados	
Velocidade do Vento	8 m/s
Razão de Velocidade de ponta (λ)	7.55
Ângulo de inclinação da pá	0.0°
Pico do Coeficiente de potência (C_p)	0.482

Os dados fornecidos no relatório foram empregados como entrada para o programa BEMT desenvolvido, permitindo a comparação dos resultados de C_p . O

resultado obtido como saída foi um C_p igual a 0,480, o que representa um erro absoluto de 0.002. Essa margem de erro reduzida sugere uma validação bem-sucedida do algoritmo, reforçando a confiabilidade.

Apesar da boa avaliação inicial, nesse segundo caso buscou-se analisar os resultados em diferentes relações de velocidade da ponta (*Tip-Speed Ratio*, λ). Com isso, referências na literatura para a turbina da NREL foram novamente consultadas JONKMAN *et al.* (2009); AL-SOLIHAT e NAHON (2018). A Figura 4.2 possibilita a comparação dos resultados de C_p para uma determinada sequência de λ (TSR).

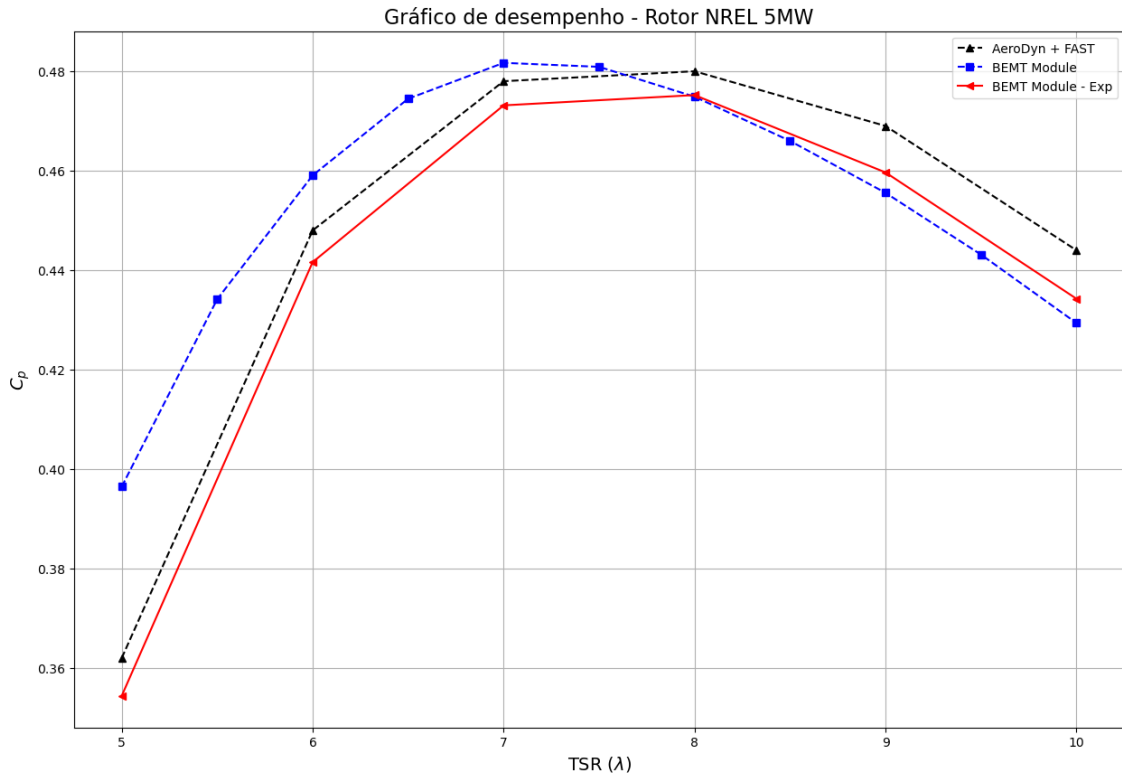


Figura 4.2: Comparação dos resultados de C_p para o NREL 5MW. Fonte: (JONKMAN *et al.*, 2009; AL-SOLIHAT e NAHON, 2018)

A partir da observação da Figura 4.2, surgem dois conjuntos distintos de resultados para o *BEMT Module*. Um deles, representado pela linha vermelha, baseia-se em valores experimentais para os coeficientes aerodinâmicos dos perfis. O segundo conjunto, delineado pela linha azul, utiliza coeficientes obtidos por meio do software XFOIL. Além disso, a Figura 4.2 destaca uma terceira linha (linha preta), que representa os resultados provenientes dos softwares da NREL, AeroDyn e FAST, e é considerada a referência para a turbina.

Nesse contexto, os resultados das duas avaliações do algoritmo revelaram-se satisfatórios, destacando-se especialmente os valores provenientes de dados experimentais. Apesar do maior erro absoluto associado ao uso do XFOIL, observa-se uma

tendência coerente nos resultados. Além disso, para valores de λ entre 7 e 8, o erro absoluto apresenta-se próximo a 0.002, um resultado significativo considerando que esse intervalo representa uma faixa de maior eficiência da turbina.

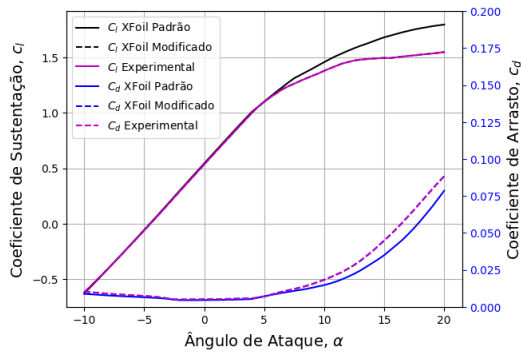
4.2 Adaptações para Função Objetivo

O objetivo final desta dissertação é aumentar a eficiência aerodinâmica de aerofólios, medida pela razão entre o coeficiente de sustentação (C_l) e o coeficiente de arrasto (C_d). Para alcançar esse objetivo, é essencial conhecer os coeficientes aerodinâmicos do aerofólio em questão. No entanto, durante o processo de otimização, surgem diversas geometrias diferentes para as quais não temos dados experimentais disponíveis, e executar softwares ou algoritmos de CFD para cada uma dessas geometrias seria extremamente custoso, especialmente porque é necessário uma ampla faixa de ângulos de ataque.

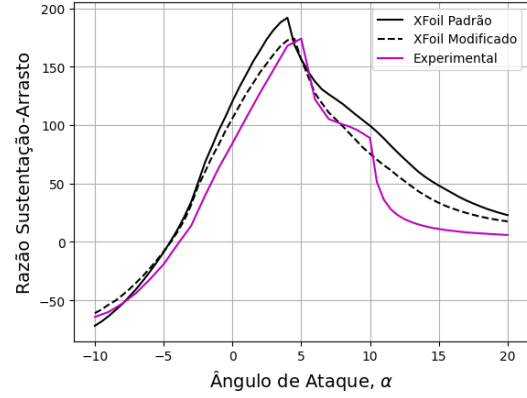
Diante disso, HANSEN (2018) e MA *et al.* (2018) optaram por utilizar o software XFOil para reduzir o tempo de processamento e garantir valores satisfatórios dos coeficientes aerodinâmicos. O XFOil é uma solução muito eficiente para esse contexto de otimização, pois permite a obtenção rápida dos coeficientes aerodinâmicos para diversas geometrias de aerofólios HANSEN (2018). No entanto, o XFOil não é totalmente adequado para aplicações em aerogeradores, devido tanto à geometria dos aerofólios quanto às condições de escoamento, geralmente com altos valores de Reynolds. Portanto, são necessárias modificações no software para melhorar seu desempenho.

Neste trabalho, utilizaremos a versão modificada do XFOil desenvolvida por HANSEN (2018), que inclui melhorias na modelagem de escoamentos em altos ângulos de ataque, críticos para o desempenho de aerofólios em turbinas eólicas. Essas modificações foram feitas para proporcionar uma melhor predição dos valores de $C_{l_{\max}}$ em aplicações de turbinas eólicas. A comparação entre os resultados do XFOil padrão, da versão modificada e dos dados experimentais pode ser observada abaixo, usando o aerofólio da ponta da turbina, o perfil NACA 64618, como sugerido por NREL JONKMAN *et al.* (2009).

Observando a Figura 4.3, é evidente a melhoria na performance do XFOil ao utilizarmos a versão modificada. Essa versão ajustada mostra uma aproximação muito mais precisa em relação aos dados experimentais, comparada ao XFOil padrão. Além das modificações implementadas por Hansen, que visam aprimorar a previsão dos valores de C_l máximo em aplicações de turbinas eólicas, também foram realizados ajustes adicionais nos parâmetros do software. Esses ajustes estão detalhados na Tabela 4.5, proporcionando maior confiabilidade no uso do programa para calcular os coeficientes aerodinâmicos necessários para a otimização.



(a) Coeficientes Aerodinâmicos.



(b) Eficiência Aerodinâmica.

Figura 4.3: Avaliação do uso da função objetivo. Fonte: Autor

Tabela 4.5: Parâmetros utilizados no Xfoil modificado. Fonte: Autor

VPAR		
N	GB	
12	A	B
	6.7	0.75

No Xfoil, os parâmetros A, B e N no menu VPAR permitem ajustes na camada limite de um aerofólio, impactando a transição do fluxo de laminar para turbulento. O fator A controla a velocidade de amplificação das perturbações, acelerando a transição; o B define a estabilidade dessas perturbações, ajudando a manter o fluxo laminar; e o N (fator de amplificação crítico) estabelece o nível necessário para que as instabilidades causem a transição. Juntos, esses parâmetros permitem simulações mais precisas do comportamento do fluxo, auxiliando no controle do arrasto e do desempenho aerodinâmico HANSEN (2018); DRELA e YOUNGREN (2001).

A utilização do software, mesmo em sua versão modificada, não é suficiente para cobrir todas as necessidades da análise, especialmente em relação ao cálculo do BEMT. Em particular, para obter coeficientes aerodinâmicos em ângulos de ataque entre -180° e $+180^\circ$, é necessário aplicar técnicas adicionais. Para preencher essa lacuna, utiliza-se o método de Viterna, que permite extrapolar os coeficientes aerodinâmicos e fornecer dados abrangentes para os ângulos de ataque elevados MAH-MUDDIN *et al.* (2017).

Os resultados obtidos com a aplicação do método de Viterna estão ilustrados na Figura 4.4. Este resultado é considerado satisfatório e atende às necessidades do trabalho, possibilitando a conclusão da preparação da função objetivo para ambos os cenários de otimização. Com essas preparações, fica-se apto a avançar com a otimização dos aerofólios e garantir que a função objetivo esteja adequadamente formulada para maximizar a eficiência aerodinâmica.

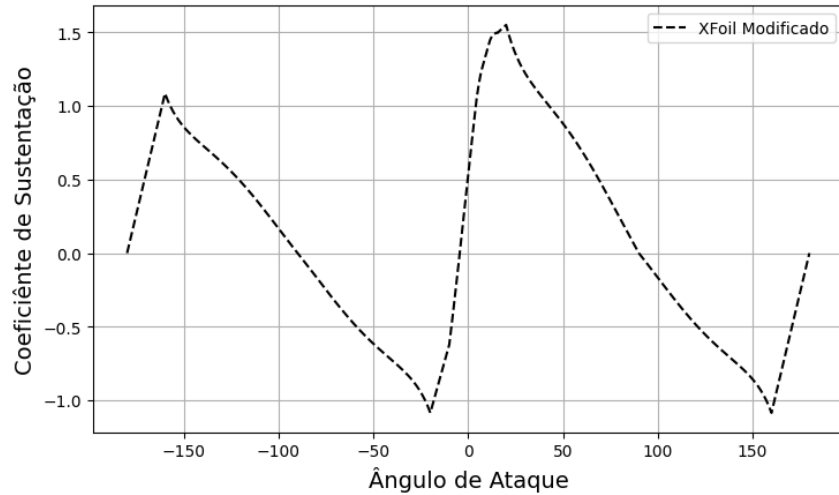


Figura 4.4: Extrapolação do Coeficiente de Sustentação pelo método de Viterna.
Fonte: Autor

4.3 Redução de Dimensionalidade

Esta etapa visa reduzir a quantidade de pontos necessários para descrever uma curva, parametrizando o aerofólio conforme descrito na Seção 2.4, utilizando a modelagem pela curva de Bézier. Baseado no trabalho de RIBEIRO *et al.* (2012), definiu-se que 6 pontos de controle em uma curva de Bézier são suficientes para descrever cada uma das superfícies do aerofólio, totalizando 12 pontos ao todo para descrever a forma aerodinâmica completa.

Inicialmente, utilizou-se a Equação 2.16 para encontrar as coordenadas cartesianas da quantidade desejada de pontos de controle. No entanto, esse método não permite fixar a posição de nenhum dos pontos, como os bordos de ataque e de fuga, buscando sempre a primeira solução de menor erro. Observou-se que, dependendo da posição de alguns pontos, a conversão dos pontos de controle na curva desejada poderia apresentar problemas, afetando posteriormente a função objetivo. O principal problema identificado foi o cruzamento das curvas, o que impedia a convergência do XFoil.

Para resolver esse problema, foi adicionada uma nova etapa utilizando um algoritmo de otimização PSO. Esse algoritmo usa o resultado anterior como ponto de partida, permitindo agora fixar a posição de algumas coordenadas, baseando-se no modelo apresentado por RIBEIRO *et al.* (2012). O resultado encontrado, ilustrado na Figura 4.5, mostrou-se satisfatório, apresentando uma ótima proximidade com os valores originais do aerofólio, permitindo-nos usar esses 12 pontos como objetos de estudo.

Além disso, ao comparar os resultados do aerofólio parametrizado com o original no XFoil, observou-se que os resultados foram equivalentes. Isso demonstra que a

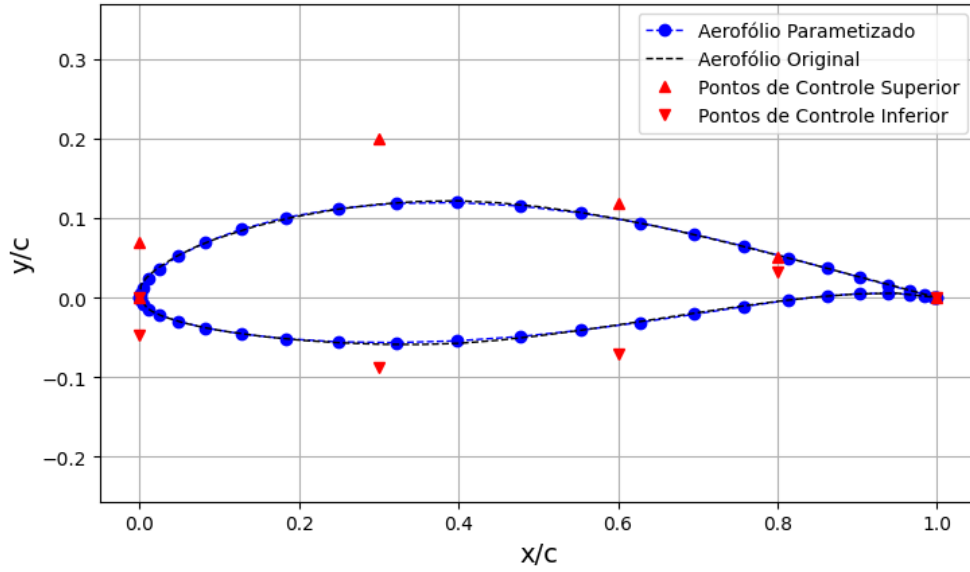


Figura 4.5: Resultado da parametrização do aerofólio. Fonte: Autor

técnica de parametrização utilizada é eficaz e será aplicada de forma consistente para outras geometrias que venham a ser otimizadas. É importante destacar que, embora tenhamos 12 pontos descrevendo o aerofólio por completo, os primeiros e os últimos pontos do intradorso e extradorso são usados apenas como pontos de partida e término da curva, definindo o comprimento do aerofólio (corda).

Dado que o trabalho foi realizado com um aerofólio unidimensional, esses pontos podem permanecer constantes, o que reduz nossa otimização para 8 pontos efetivos. Essa simplificação facilita o processo de otimização, tornando-o mais eficiente sem sacrificar a precisão.

4.4 Otimização do Aerofólio

Nesta seção, são discutidos os resultados obtidos a partir da otimização dos aerofólios. Inicialmente, será abordada a análise de convergência realizada para identificar os melhores parâmetros a serem utilizados no processo de otimização. Essa análise é crucial para garantir que os parâmetros escolhidos conduzam a uma otimização eficiente e eficaz, resultando em um design aerodinâmico otimizado.

No que diz respeito à função objetivo, a otimização considerou maximizar o coeficiente de sustentação para uma dada sustentação e minimizar o arrasto, com o objetivo de melhorar a eficiência aerodinâmica global. A faixa de ângulo de ataque escolhida variou entre -5° e 18° , com incrementos de 0.1, o que garante uma cobertura ampla e detalhada para a análise aerodinâmica dos aerofólios, permitindo avaliar seu desempenho em diferentes condições de operação. Além disso, para todas as análises ao longo da otimização, foi utilizado um número de Reynolds igual

a 7.400.000, pois este é o Reynolds correspondente ao ponto ótimo analisado para o aerofólio de referência.

Em seguida, são apresentados os resultados específicos da otimização, demonstrando como o processo foi aplicado a cada um dos aerofólios em estudo. Através desta abordagem, visa-se detalhar de forma clara e sistemática os passos seguidos e os resultados alcançados, estabelecendo uma base sólida para a validação e aplicação prática das técnicas de otimização desenvolvidas.

4.4.1 Análise de Convergência

A análise de convergência é um passo essencial em qualquer processo de otimização, pois assegura que o algoritmo alcance um mínimo global de maneira eficaz, sem a necessidade de ajustes excessivos nos parâmetros. Esse processo é crucial para garantir tanto a eficiência quanto a precisão da otimização. Neste contexto, a dissertação realizou uma análise de convergência focada em dois parâmetros-chave do método híbrido proposto: o número de indivíduos e o número de iterações.

A análise consistiu na execução de uma série de testes, totalizando 36 combinações distintas de valores para os parâmetros mencionados. Esses testes foram cuidadosamente distribuídos para abranger uma ampla gama de configurações, permitindo uma avaliação detalhada sobre como cada combinação de parâmetros impacta o desempenho da otimização.

Para o número de indivíduos, os valores testados foram: 5, 10, 15, 20, 30 e 40. Já para o número de iterações, os valores variaram entre 50, 100, 150, 200, 250 e 300. A combinação desses valores possibilitou uma exploração minuciosa do espaço de busca, facilitando a identificação da configuração que oferece o melhor equilíbrio entre eficiência computacional e precisão dos resultados.

Após o processo iterativo e as avaliações empíricas realizadas, concluiu-se que a combinação de 30 indivíduos e 250 iterações se destacou como a mais adequada. Embora outras combinações também tenham gerado resultados semelhantes, esta configuração se mostrou mais eficiente em termos de tempo de processamento. Isso se deve ao fato de que, ao aumentar qualquer um dos parâmetros além dessa configuração, o tempo de execução do algoritmo cresceu consideravelmente, sem proporcionar ganhos significativos na qualidade dos resultados.

4.4.2 Impacto da Otimização na Eficiência Aerodinâmica

Os parâmetros aplicados ao algoritmo de otimização híbrida, fundamentais para a eficácia das otimizações realizadas nesta dissertação, foram definidos buscando desempenho e eficácia. Os valores comuns a ambos os métodos constituintes ao algoritmo foram estabelecidos previamente na análise de convergência, assegurando

uma base de referência consistente. Já os parâmetros específicos para cada, foram escolhidos empiricamente, fundamentando-se em experiências anteriores e nos resultados de otimizações passadas, com o objetivo de assegurar um desempenho robusto. Esses parâmetros, listados nas Tabelas 4.6 e 4.7, serão mantidos uniformemente em todas as otimizações subsequentes ao longo da pesquisa, garantindo tanto a comparabilidade quanto a confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 4.6: Parâmetros associados ao enxame de partículas. Fonte: Autor

Parâmetros	Valor
Qnt. de Indivíduos	30
N_{max} de Iterações	125
Fator de Inércia (α)	0
Fator Social e Individual (β)	2

Tabela 4.7: Parâmetros associado a evolução diferenciada. Fonte: Autor

Parâmetros	Valor
Qnt. de Indivíduos	30
N_{max} de Iterações	125
Função Peso (F_p)	0.8
Fator de <i>crossover</i>	0.5

A implementação do algoritmo híbrido demonstrou eficácia, e os resultados foram positivos. A variação geométrica que contribuiu para o ganho de desempenho esperado está ilustrada na Figura 4.6. Esta imagem revela um leve aumento na curvatura (camber) e na espessura máxima do aerofólio, sem grandes deformações que poderiam comprometer a construção da pá. Essas modificações asseguram um aumento significativo na eficiência, entorno de 8%, mantendo a viabilidade prática do aerofólio otimizado.

Na Figura 4.7, é apresentada a diferença de eficiência entre o perfil otimizado e o perfil original, medida pela razão sustentação-arrasto (*lift-to-drag ratio*, c_l/c_d), destacando que o ganho obtido não acarretou um desvio significativo do ângulo de ataque de maior eficiência, sugerindo que as premissas e modelos anteriores permanecem adequados.

Além disso, os gráficos complementares, incluindo a polar de arrasto e os coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de ataque, estão disponíveis na Figura 4.8. Esses dados indicam que o aumento na eficiência está fortemente associado a um incremento na sustentação, enquanto o arrasto permaneceu praticamente inalterado. Este resultado é consistente com as expectativas, considerando que aerofólios projetados para turbinas eólicas costumam apresentar baixo arrasto.

Em resumo, a otimização do aerofólio NACA 64618 revelou um desempenho muito bom, com um aumento notável na sustentação sem comprometer o arrasto.

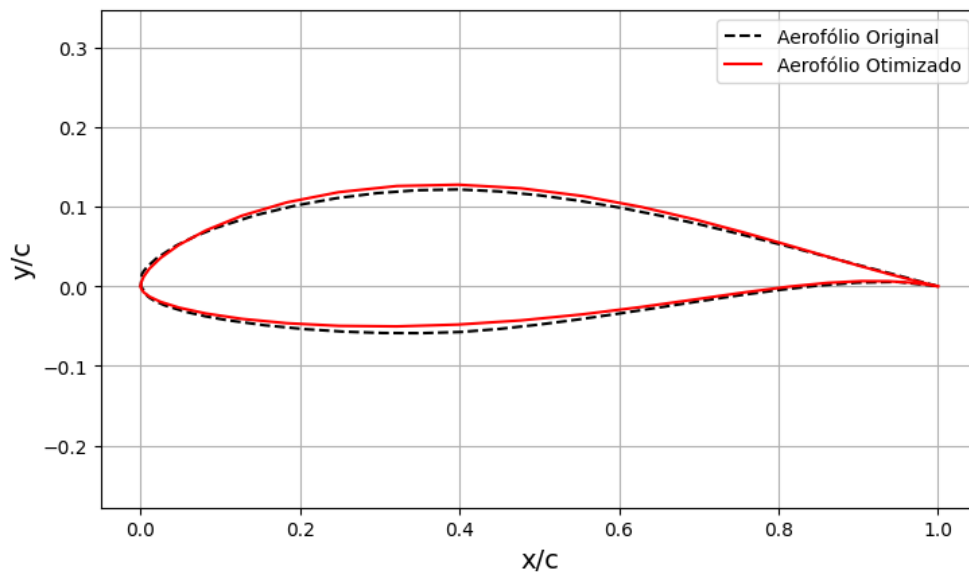


Figura 4.6: Comparativo entre a geometria dos perfis. Fonte: Autor

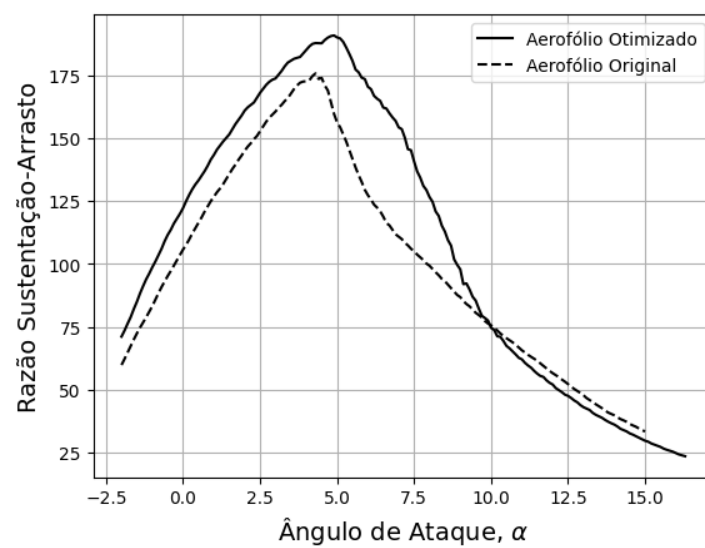
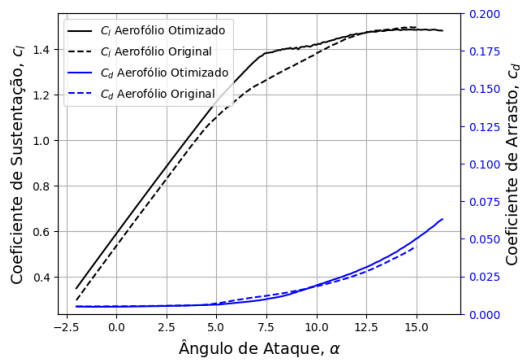
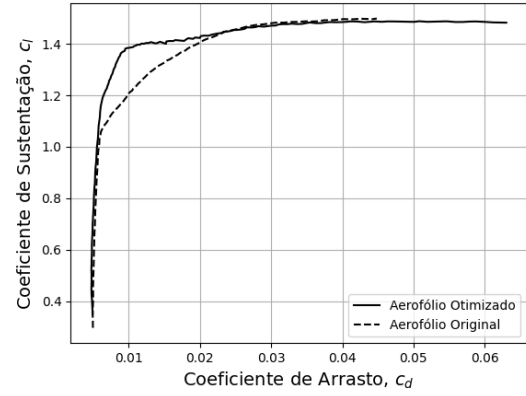


Figura 4.7: Ganho de eficiência do aerofólio otimizado em relação ao original. Fonte: Autor



(a) Coeficientes Aerodinâmicos.



(b) Polar de Arrasto.

Figura 4.8: Performance aerodinâmica do aerofólio otimizado. Fonte: Autor

Esses resultados validam a abordagem adotada e confirmam a melhoria significativa na eficiência aerodinâmica, o que atesta a eficácia da metodologia empregada.

4.5 Otimização da Pá do Aerogerador

A partir da última otimização realizada no aerofólio NACA 64618, definimos os parâmetros gerais de otimização que foram aplicados aos demais aerofólios. Com base nesses parâmetros estabelecidos, foi dada continuidade ao processo de otimização para os aerofólios DU 93W210 LM e DU 93W250 LM. Esses aerofólios compõem a parte final da pá do aerogerador, desempenhando um papel crucial na eficiência aerodinâmica e no desempenho geral da turbina eólica.

Nesta seção, inicia-se apresentando os resultados obtidos com a otimização do aerofólio DU 93W210 LM. Assim como foi feito com o NACA 64618, a análise segue uma estrutura similar, destacando os principais resultados, incluindo as mudanças nos coeficientes de sustentação e arrasto, e o impacto na eficiência geral. Posteriormente, prosseguiremos com a apresentação dos resultados da otimização do aerofólio DU 93W250 LM.

Assim como no caso apresentado anteriormente, onde foi necessário realizar a parametrização inicial do aerofólio DU 93W210 LM. Essa parametrização é fundamental para estabelecer uma base sólida de comparação e garantir que a otimização seja realizada de maneira eficiente. O impacto dessa parametrização pode ser visualizado na Figura 4.9, que ilustra o comportamento inicial do aerofólio antes da otimização. As métricas obtidas durante esse processo de parametrização incluem um MAPE de 0.619, um MAE de 0.0138 e um RMSE de 0.00027, esses resultados indicam uma boa precisão no ajuste inicial dos parâmetros.

Com essa base bem definida, foi possível avançar para a otimização da geometria

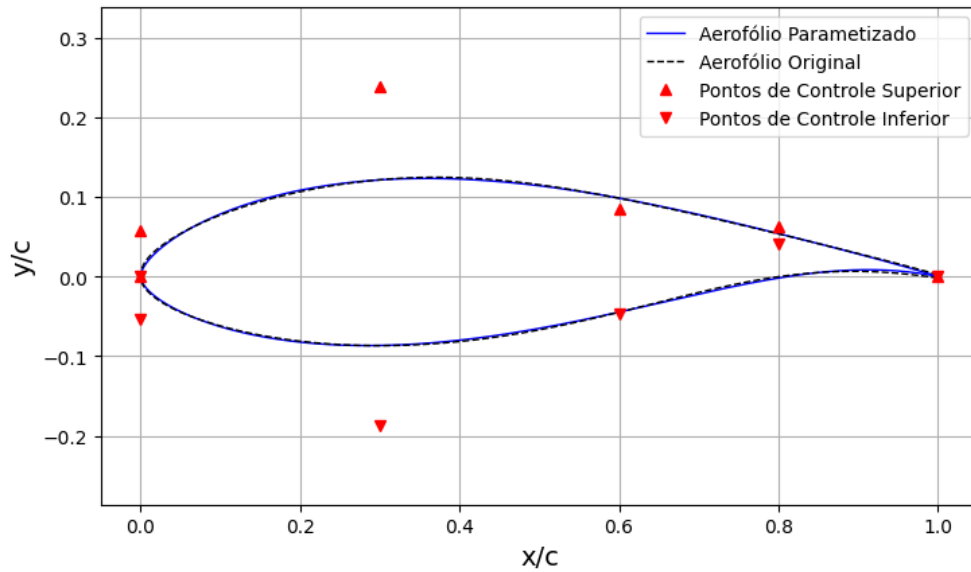


Figura 4.9: Resultado da parametrização do DU 93W210 LM. Fonte: Autor

do aerofólio, conforme mostrado na Figura 4.10. Durante o processo de otimização, observou-se uma variação notável no camber do aerofólio, enquanto a espessura final sofreu alterações menos expressivas. Essa modificação na curvatura do aerofólio é crucial para melhorar o desempenho aerodinâmico e maximizar a eficiência da pá do aerogerador.

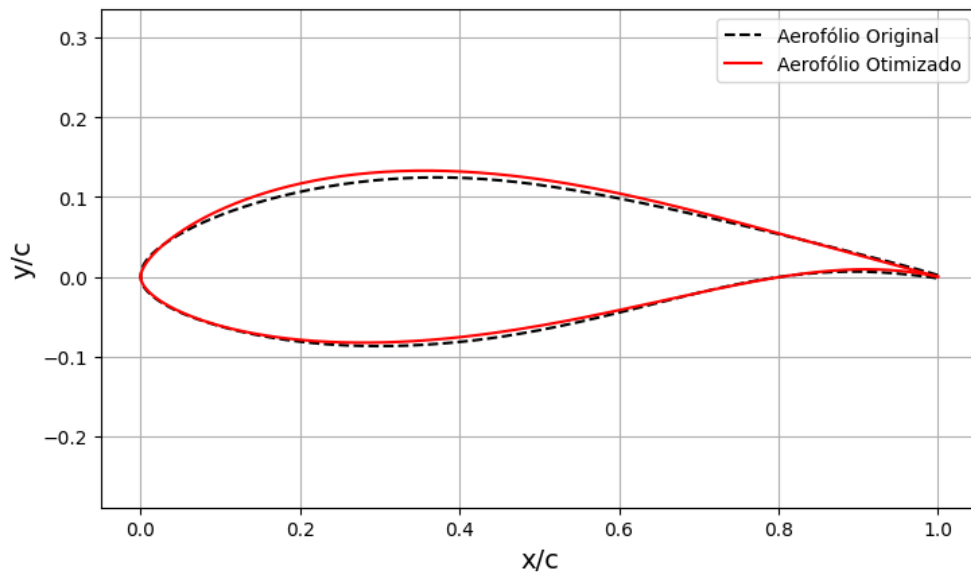


Figura 4.10: Resultado da otimização do DU 93W210 LM. Fonte: Autor

Com a otimização do aerofólio DU 93W210 LM, foi possível alcançar um ganho significativo na eficiência aerodinâmica, representando uma melhoria de aproximadamente 28%. Esse incremento é um indicador claro de que as modificações geométricas realizadas durante o processo de otimização surtiram efeito positivo,

aprimorando o desempenho do aerofólio em condições operacionais. A Figura 4.11 ilustra claramente essa melhoria, destacando a comparação entre a performance do aerofólio antes e depois da otimização.

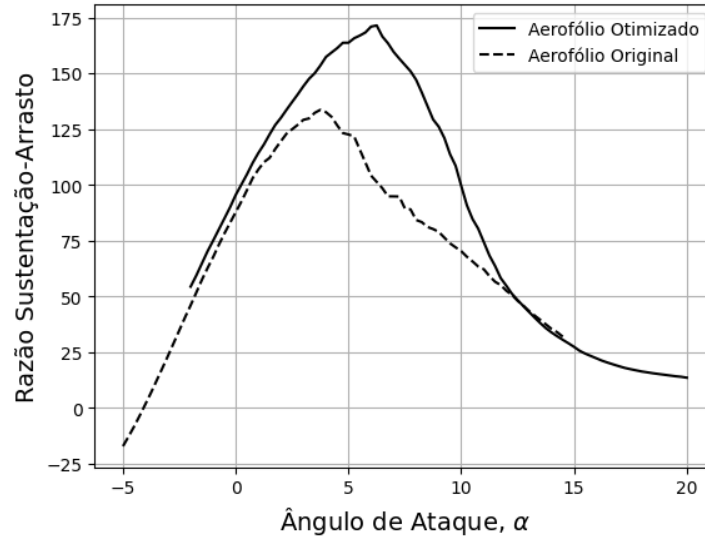


Figura 4.11: Ganho de eficiência do DU 93W210 LM otimizado. Fonte: Autor

Para entender melhor os fatores que contribuíram para esse aumento de eficiência, é necessário analisar outros gráficos. Ao observar o gráfico dos coeficientes em função do ângulo de ataque e a polar de arrasto (Figura 4.12), podemos concluir que o ganho de eficiência está diretamente relacionado ao aumento da sustentação. Importante destacar que não houve variações significativas no arrasto do perfil, o que é bastante satisfatório, considerando que normalmente um aumento na sustentação é acompanhado por um incremento no arrasto induzido.

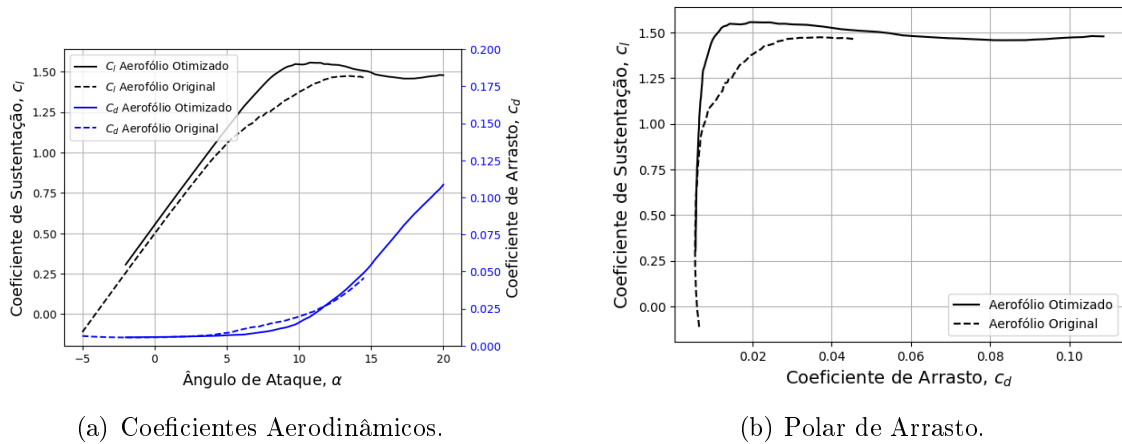


Figura 4.12: Performance aerodinâmica do DU 93W210 LM otimizado. Fonte: Autor

Assim, além de atingir o objetivo principal de melhorar a geometria do aerofólio, o processo de otimização demonstrou, mais uma vez, sua eficácia na melhoria do

desempenho aerodinâmico. Os resultados obtidos confirmam que a metodologia aplicada é robusta e capaz de proporcionar ganhos significativos em eficiência.

Dando sequência à análise, são apresentados agora os resultados da otimização do aerofólio DU 93W250 LM. Inicialmente, foi realizada a parametrização desse aerofólio, cujos resultados podem ser observados na Figura 4.13. As métricas obtidas foram: MAPE de 0.642, MAE de 0.0161 e RMSE de 0.00037, demonstrando um ajuste preciso dos parâmetros iniciais para o aerofólio.

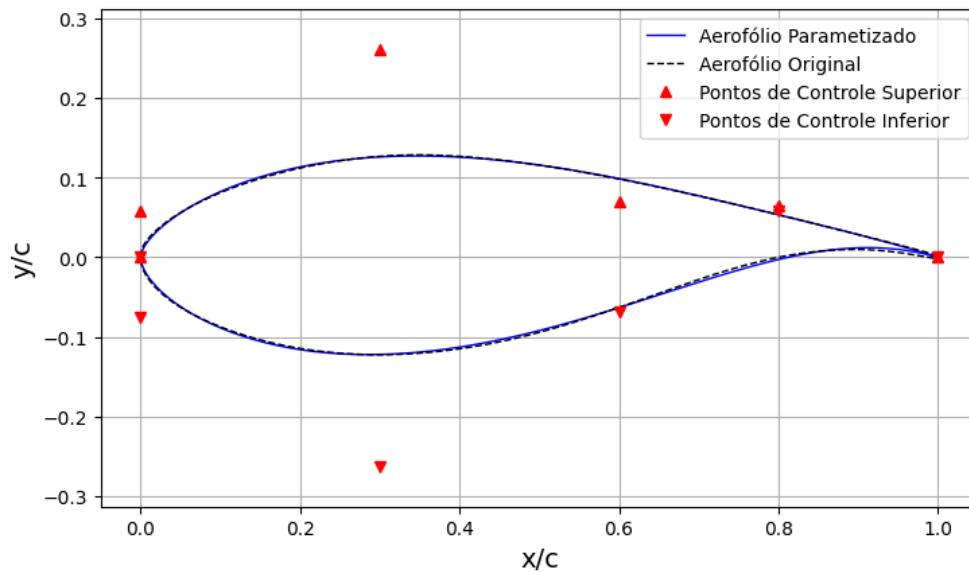


Figura 4.13: Resultado da parametrização do DU 93W250 LM. Fonte: Autor

Após a parametrização, a geometria otimizada do aerofólio DU 93W250 LM pode-se então ser modificada, chegando ao resultado encontrado pela Figura 4.14. Observou-se uma mudança significativa no camber, enquanto a espessura do aerofólio não apresentou grandes variações. Visualmente, a alteração na geometria é sutil, o que, à primeira vista, pode não sugerir um ganho expressivo. No entanto, os resultados indicam um aumento de eficiência em torno de 13%, evidenciando que a otimização foi bem-sucedida.

Esse ganho de eficiência está novamente associado a um aumento na sustentação, enquanto os valores de arrasto se mantiveram próximos aos originais, esses resultados podem ser visualizados pelas Figuras 4.15 e 4.16. Essa manutenção do arrasto, combinada com o aumento da sustentação, é um indicador claro de que as mudanças geométricas aplicadas foram eficazes em melhorar o desempenho aerodinâmico do aerofólio.

Com a conclusão das otimizações para ambos os aerofólios, constatamos que todas as alterações mapeadas resultaram em melhorias positivas. No entanto, para validar essas mudanças e verificar o impacto real no desempenho do aerogerador, foi utilizado o método *Blade Element Momentum Theory*, previamente desenvolvido e

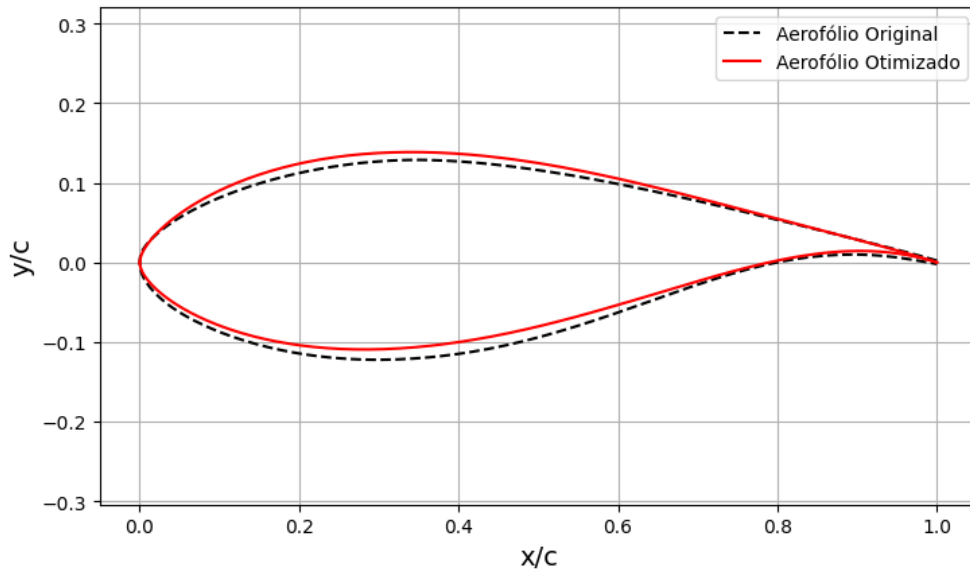


Figura 4.14: Resultado da otimização do DU 93W250 LM. Fonte: Autor

verificado. Essa etapa é crucial para confirmar que as otimizações realizadas nos aerofólios se traduzem em benefícios tangíveis para a operação dos aerogeradores, garantindo eficiência e desempenho aprimorados nas condições aplicadas.

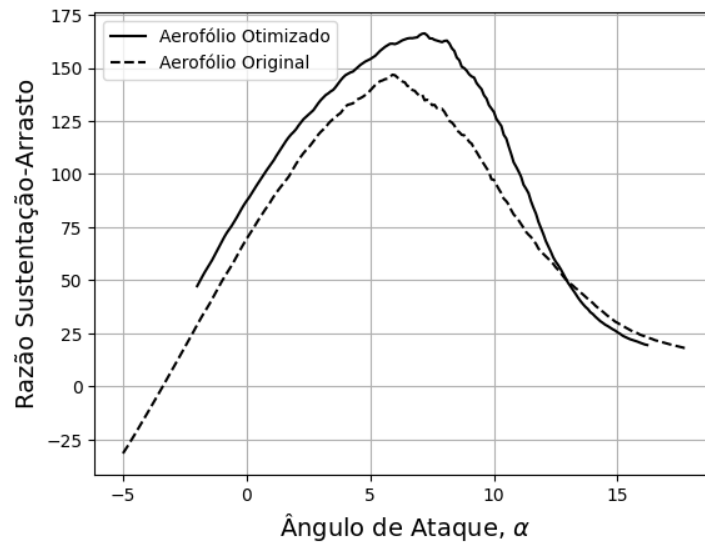


Figura 4.15: Ganho de eficiência do DU 93W250 LM otimizado. Fonte: Autor

4.6 Avaliação da Performance do Aerogerador

Nesta seção, são apresentados os resultados finais da performance da turbina eólica com a pá composta pelos aerofólios otimizados. As análises foram realizadas utilizando o algoritmo de BEMT desenvolvido e previamente validado. Os resultados obtidos representam a consolidação de todas as etapas anteriores de estudo.

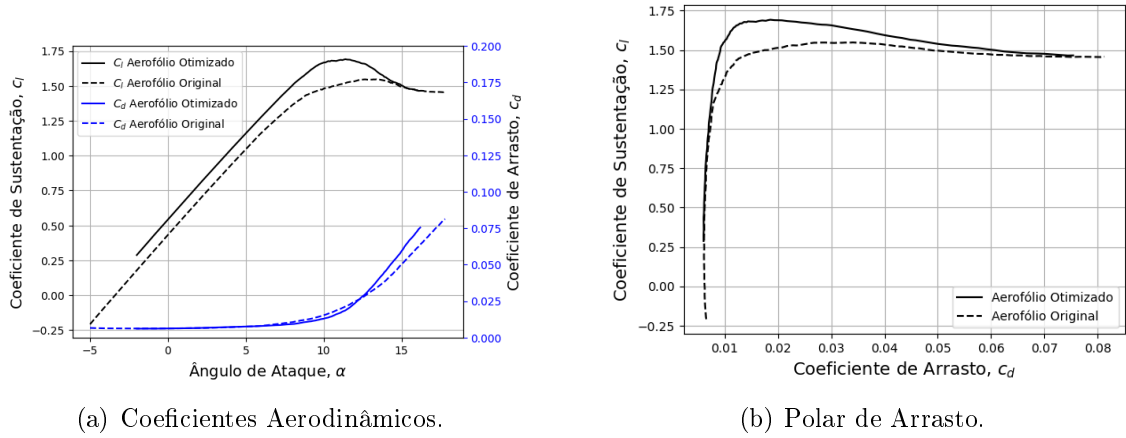


Figura 4.16: Performance aerodinâmica do DU 93W250 LM otimizado. Fonte: Autor

O gráfico apresentado na Figura 4.17 foi gerado substituindo-se os aerofólios previamente mapeados pelos aerofólios otimizados, posicionando-os conforme indicado na Tabela 4.3. A análise deste gráfico revela que, com a substituição, houve uma pequena redução no C_p máximo alcançado e um deslocamento do gráfico para a esquerda, embora o $C_{p_{max}}$ ocorra para $\lambda = 7$ em ambas as curvas. Este deslocamento da curva para a esquerda indica um aumento do C_p para valores menores de λ antes do ponto de máximo C_p . Esses resultados sugerem que, embora a eficiência máxima tenha sido reduzida, há um benefício em termos de desempenho para regimes de operação com menor razão de velocidade de ponta, o que pode ser vantajoso em determinadas condições de operação da turbina.

O aumento da sustentação proporcionado pelos aerofólios otimizados, que resultou em maior eficiência, também é responsável pelo aumento do torque gerado pelo aerogerador, especialmente porque os aerofólios otimizados estão localizados em regiões que contribuem significativamente para o torque total da turbina. Conforme discutido por BURTON *et al.* (2001), esse aumento no torque resultará em uma maior perda na esteira formada quando o fluido passa pela turbina, sendo essa perda mais acentuada para valores maiores de λ , os quais correspondem a valores mais elevados de RPM. Portanto, o aumento do torque justifica a redução observada no C_p , mas também explica o incremento do C_p para menores valores de λ até o ponto de máximo.

Diante das análises anteriores e em busca de uma configuração ótima que pudesse melhorar o desempenho do aerogerador, foram realizados testes adicionais com diferentes configurações de aerofólios. Isso envolveu a alteração tanto do posicionamento quanto dos perfis aerodinâmicos dentro da região previamente especificada. Essa abordagem permitiu uma análise combinatória mais aprofundada, visando identificar a configuração que oferecesse o maior ganho de performance. Os resultados

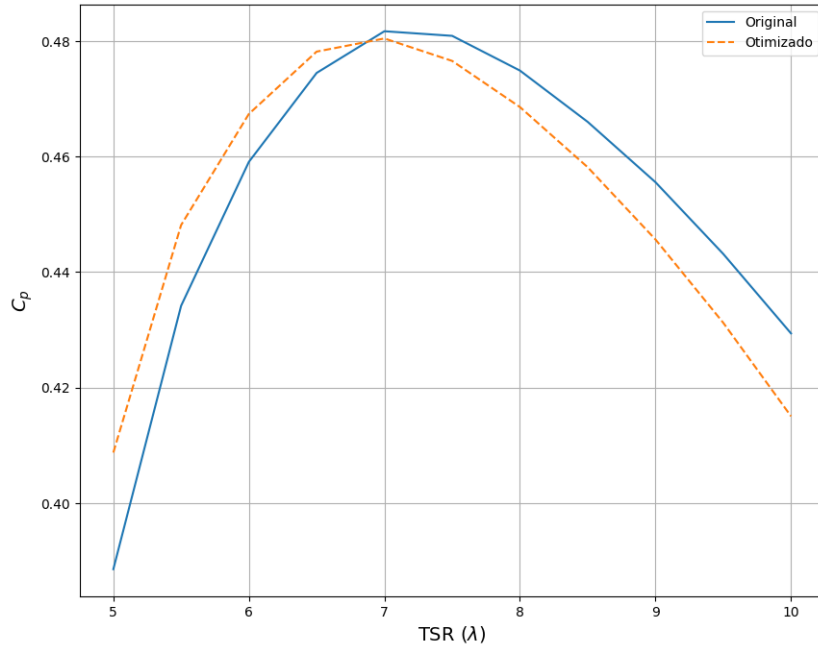


Figura 4.17: Variação do Coeficiente de Potência pela razão de velocidade de ponta.
Fonte: Autor

indicaram que ao substituir o aerofólio DU 93W210 LM pelo NACA 64618 Otimizado, conforme mostrado na Tabela 4.8, que destaca em **negrito** os novos aerofólios que compõem a turbina, foi possível alcançar um desempenho superior em comparação com a configuração inicial.

Os aerofólios localizados nas regiões próximas ao hub das pás da turbina não foram ajustados nesta pesquisa, pois sua contribuição para o desempenho global é menos significativa. Nessas áreas, a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto exerce menor influência na eficiência aerodinâmica, tornando os ajustes menos relevantes. Além disso, alterações nesses aerofólios poderiam intensificar as perdas na esteira, sem trazer melhorias significativas para a performance da turbina, justificando sua manutenção nos formatos originais BURTON *et al.* (2001).

A Figura 4.18 ilustra que, semelhante ao caso anterior, houve um ganho de performance para valores menores de coeficiente de potência (C_p) e uma leve perda para valores maiores. No entanto, com essa substituição, foi possível atingir o mesmo nível de C_p máximo da turbina original, mantendo um aumento significativo de performance em uma região de menor RPM, o que é vantajoso para a operação em condições específicas de vento. Com essa nova configuração, alcançar o patamar do C_p máximo indica que foi possível produzir o mesmo volume de energia no *Tip-Speed Ratio* (λ) de melhor desempenho da turbina original. Além disso, permite aumentar a produção de energia em situações de *lambda* menores, ampliando a faixa de operação eficiente do aerogerador.

Como destacado anteriormente, esse aumento na produção de energia está dire-

Tabela 4.8: Nova distribuição da pá do aerogerador 5MW NREL. Fonte: Adaptado de JONKMAN *et al.* (2009)

Raio r (m)	$\mu = r/R$	Corda c (m)	Pitch β (graus)	Aerofólio
2,8667	0,0465	3,542	13,308	Circular
5,6000	0,0908	3,854	13,308	Circular
8,3333	0,1352	4,167	13,308	Circular 2
11,7500	0,1906	4,557	13,308	DU 93W405 AD
15,8500	0,2571	4,652	11,480	DU 93W350 AD
19,9500	0,3236	4,458	10,162	DU 93W350 AD
24,0500	0,3902	4,249	9,011	DU 93W300 LM
28,1500	0,4567	4,007	7,795	DU 93W250 LM Otimizado
32,2500	0,5232	3,748	6,544	DU 93W250 LM Otimizado
36,3500	0,5897	3,502	5,361	NACA 64618 Otimizado
40,4500	0,6563	3,256	4,188	NACA 64618 Otimizado
44,5500	0,7228	3,010	3,125	NACA 64618 Otimizado
48,6500	0,7893	2,764	2,319	NACA 64618 Otimizado
52,7500	0,8558	2,518	1,526	NACA 64618 Otimizado
56,1667	0,9113	2,313	0,863	NACA 64618 Otimizado
58,9000	0,9556	2,086	0,370	NACA 64618 Otimizado
61,6333	1,0000	1,419	0,106	NACA 64618 Otimizado

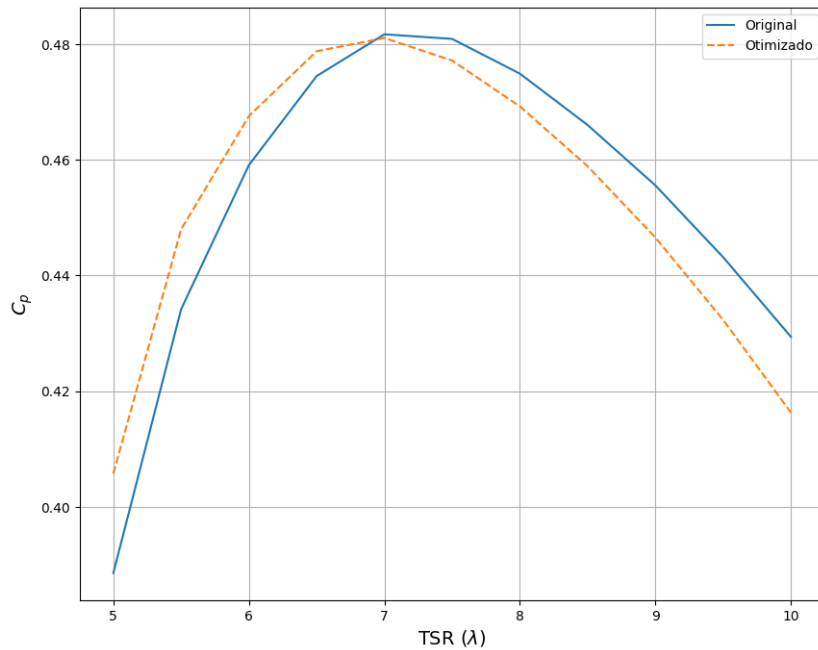


Figura 4.18: Comportamento do Coeficiente de Potência pós ajuste dos aerofólios. Fonte: Autor

tamente associado a um aumento no torque gerado pela turbina. Para comprovar essa relação, foi gerada a Figura 4.19, que compara a configuração final escolhida com a configuração original da turbina de 5MW da NREL. Na figura, é possível observar um aumento significativo do torque para valores de λ inferiores ao de maior rendimento, enquanto o λ de maior rendimento apresenta praticamente o mesmo torque.

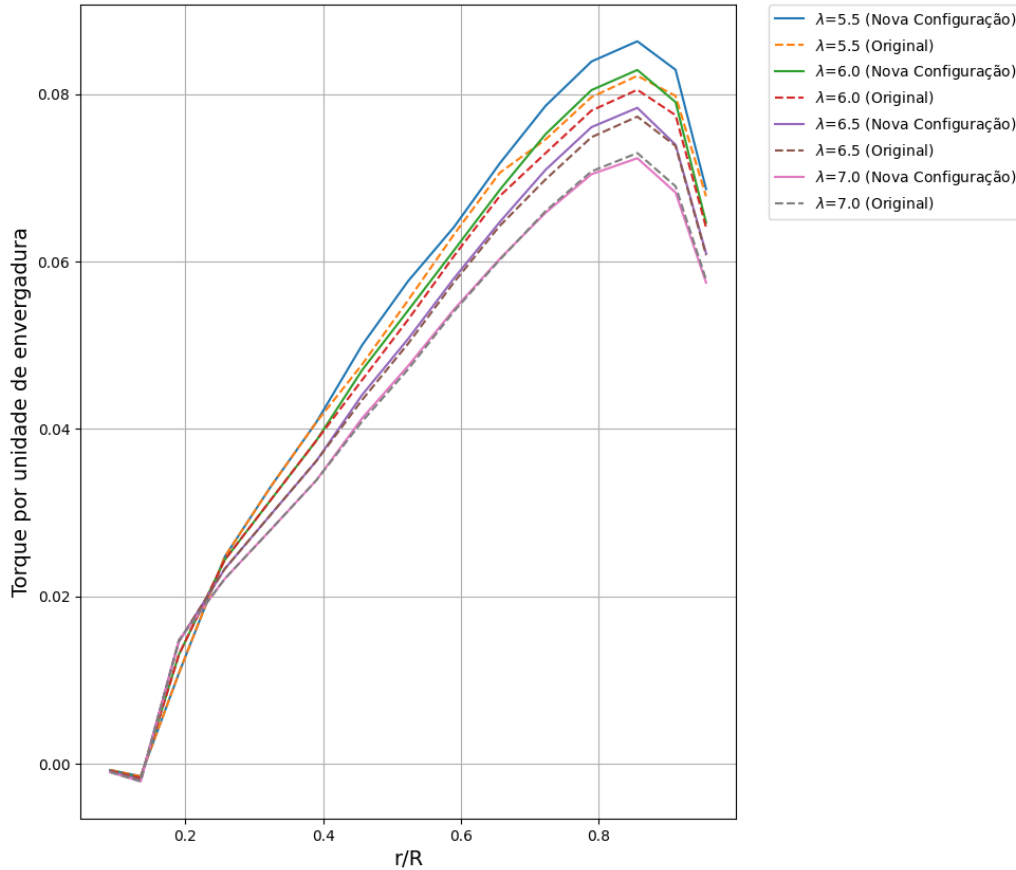


Figura 4.19: Ganho de torque associado a nova configuração de aerofólios. Fonte: Autor

Esse aumento no torque permite que o aerogerador opere a um RPM menor, o que é particularmente vantajoso em localizações *offshore*, onde a magnitude dos ventos é superior. A capacidade de gerar um maior volume de energia a rotações mais baixas não só contribui para um desempenho geral mais eficiente, mas também implica em menor desgaste dos componentes da turbina. Isso resulta em uma operação mais otimizada, associada a menores esforços mecânicos, o que pode prolongar a vida útil dos componentes e melhorar a adequação às condições de vento mais intensas.

Capítulo 5

Conclusão

A transição para fontes renováveis é uma necessidade urgente, e a tecnologia eólica surge como uma alternativa promissora para atender a essa demanda crescente. A dissertação aqui apresentada reforça a importância da otimização de aerofólios para turbinas eólicas *offshore* como uma solução viável para a diversificação da matriz energética brasileira e para o avanço da produção de energia sustentável em escala global.

A implementação do algoritmo da Teoria de Elementos de Momento de Pás, em conjunto com o uso de um método híbrido de otimização heurística, foi eficaz na busca por configurações de aerofólios que aumentem a eficiência das turbinas eólicas. O BEMT demonstrou excelente precisão ao prever a performance aerodinâmica da turbina eólica, consolidando-se como uma ferramenta confiável ao longo das comparações realizadas. O algoritmo de otimização heurística, por sua vez, apresentou resultados encorajadores, identificando aerofólios otimizados que, quando aplicados, evidenciaram melhorias nas condições de operação da turbina, especialmente em regimes de menor razão de velocidade de ponta (λ), que caracteriza a operação de turbinas *offshore*. Esse equilíbrio entre precisão e eficiência é crucial para a operação eficaz das turbinas em diferentes condições de vento.

As análises realizadas indicaram que a otimização dos aerofólios contribuiu para uma melhora significativa na performance da turbina. A substituição dos aerofólios originais pelos otimizados resultou em maior eficiência operacional em rotações mais baixas, o que é fundamental para a flexibilidade e durabilidade das turbinas *offshore*. Esse avanço é particularmente importante, pois possibilita uma operação mais eficiente em condições variadas, reduzindo o desgaste dos componentes e potencializando a geração de energia em cenários de vento menos intensos.

Adicionalmente, o aumento do torque observado na substituição dos aerofólios indica uma contribuição significativa dos aerofólios otimizados nas regiões críticas da pá, conforme suportado pelas teorias discutidas por Burton. Esse aumento de torque, embora cause uma perda no C_p em altos valores de λ , proporciona um ganho

em regimes de operação de baixa rotação, potencializando a geração de energia em condições menos exigentes.

A investigação posterior, que envolveu a reconfiguração dos aerofólios otimizados e a substituição do DU 93W210 LM pelo NACA 64-618 otimizado, resultou em uma configuração ainda mais eficiente, demonstrando a importância de uma análise iterativa e detalhada na busca pela configuração aerodinâmica ideal. A capacidade de o aerogerador gerar mais energia em rotações mais baixas, conforme evidenciado na nova configuração, representa um avanço significativo para a eficiência e a durabilidade das turbinas eólicas *offshore*.

Esta pesquisa visa, portanto, consolidar os avanços tecnológicos na área de energia eólica, proporcionando soluções que não apenas aumentem a eficiência de geração, mas também promovam a sustentabilidade operacional, alinhando-se aos objetivos de diversificação energética e desenvolvimento sustentável no Brasil e no mundo.

5.1 Trabalhos Futuros

Esta dissertação abriu caminho para diversas oportunidades de pesquisa que podem contribuir para o avanço na área de otimização aerodinâmica. Uma das possibilidades é substituir o uso do XFOil por simulações CFD diretamente integradas ao algoritmo de otimização, embora essa abordagem exija tempos computacionais significativamente maiores. Como alternativa, o desenvolvimento de um modelo baseado em aprendizado de máquina surge como uma solução promissora. Esse modelo poderia substituir o XFOil, oferecendo maior precisão nas previsões aerodinâmicas para uma ampla faixa de números de Reynolds e aproximando-se mais dos resultados experimentais. Além disso, o uso de aprendizado de máquina apresenta a vantagem de ser consideravelmente mais rápido e eficiente em comparação aos modelos baseados em CFD.

Outra linha de investigação importante é a otimização integral das pás de aerogeradores. Desenvolver uma metodologia que incorpore diretamente os resultados do BEMT na função objetivo pode trazer avanços significativos no design das pás, permitindo uma melhoria substancial no desempenho geral dos aerogeradores. Adicionalmente, a análise e a otimização da distribuição de perfis aerodinâmicos ao longo da pá permanecem como áreas ainda pouco exploradas, mas com grande potencial para aumentar a eficiência das turbinas.

Um aspecto relevante para futuras investigações é a otimização do espaçamento entre aerogeradores em um parque eólico. Criar uma metodologia que considere a distribuição do vento e o layout do parque pode maximizar a produção de energia e melhorar a eficiência operacional. Este desenvolvimento pode proporcionar ganhos

substanciais na performance dos parques eólicos, promovendo uma abordagem mais estratégica para o planejamento e a disposição das turbinas.

Essas direções de pesquisa têm o potencial de avançar significativamente o campo da engenharia de aerogeradores e contribuir para soluções mais eficazes e sustentáveis na geração de energia eólica.

Referências Bibliográficas

- BURTON, T., JENKINS, N., SHARPE, D., et al. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2001.
- WRIGLEY, E. A. “Energy and the English industrial revolution”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 371, n. 1986, pp. 20110568, 2013.
- CHANG, G., JIANGUO, D., ADU, D., et al. “Energy production and its emission generation impact on the environment.” *Current Science (00113891)*, v. 121, n. 2, 2021.
- RITCHIE, H., ROSADO, P., ROSER, M. “Energy Production and Consumption”, *Our World in Data*, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>>. [Acessado 12 Set, 2024].
- IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. “Climate Change 2021: The Physical Science Basis”. 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>>. [Acessado 20 Nov, 2023].
- IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. “Enabling frameworks for offshore wind scaleup: Innovations in permitting”. 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Sep/IRENA_GWEC_Enabling_frameworks_offshore_wind_2023.pdf>. [Acessado 19 Nov, 2023].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. “World Energy Balances: Overview”. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>>. IEA, Paris. Licence: CC BY 4.0.
- ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA”. 2023. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>>. [Acessado 12 Set, 2024].

- JUNIOR, M. R., FIGUEIREDO, P. S., TRAVASSOS, X. L. “Routes for the wind power generation in Brazil: a feasibility study for the state of Ceará”, *Journal on Innovation and Sustainability RISUS*, v. 14, n. 1, pp. 113–128, 2023.
- HUNT, J. D., STILPEN, D., DE FREITAS, M. A. V. “A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 88, pp. 208–222, 2018.
- BORGES, F. Q. “Crise de energia elétrica no Brasil-uma breve reflexão sobre a dinâmica de suas origens e resultados”, *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218*, v. 2, n. 10, pp. e210809–e210809, 2021.
- SAMPAIO, K. R. A., BATISTA, V. “O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: Uma revisão de literatura”, *Research, Society and Development*, v. 10, n. 1, pp. e57710112107–e57710112107, 2021.
- DE LIMA CAMARGO, F., DOS SANTOS, N. C., DA SILVA, R. G. “Wind Energy in Brazil: Current Overview and Projections on Power Generation”, .
- ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. “Infovento Offshore 2024”. 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/03/424_ABEEOLICA_INF_OFFSHORE_ED03_DIGITAL_PT_V2.pdf>. [Acessado 08 Set, 2024].
- ABEE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. “Boletim Anual 2023”. 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf>. [Acessado 08 Set, 2024].
- DE FREITAS CAVALCANTI, J. T., DE LIMA, J. G., DO NASCIMENTO MELO, M. R., et al. “Fossil fuels, nuclear energy and renewable energy”, *Seven Editora*, 2023.
- RIBEIRO, A., AWRUCH, A., GOMES, H. “An airfoil optimization technique for wind turbines”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 10, pp. 4898–4907, 2012.
- HANSEN, T. “Airfoil optimization for wind turbine application”, *Wind Energy*, v. 21, n. 7, pp. 502–514, 2018.
- FOODY, R., COBURN, J., AIRD, J. A., et al. “Quantitative comparison of power production and power quality onshore and offshore: a case study from

- the eastern United States”, *Wind Energy Science*, v. 9, n. 1, pp. 263–280, 2024.
- VOGEL, E., SARAIVA, G., KOBE, S., et al. “Onshore versus offshore capacity factor and reliability for wind energy production in Germany: 2010–2022”, *Energy Science & Engineering*, v. 12, n. 5, pp. 2198–2208, 2024.
- SHARMA, P., GUPTA, B., PANDEY, M., et al. “Recent advancements in optimization methods for wind turbine airfoil design: A review”, *Materials Today: Proceedings*, v. 47, pp. 6556–6563, 2021.
- IPCC, T. I. P. O. C. C. “Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”, *Renewable Energy*, v. 20, n. 11, 2011.
- EERE, OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. “Wind Turbines: the Bigger, the Better”. 2024. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>>. [Acessado 20 Nov, 2024].
- PINTO, L. A.-A. I. C., MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B. “O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais”, *Revista Ambiente & Água*, v. 12, pp. 1082 – 1100, 12 2017. ISSN: 1980-993X. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2017000601082&nrm=iso>.
- EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. “Roadmap Eólica Offshore Brasil”. 2020. Disponível em: <<https://storymaps.arcgis.com/stories/85011a3a5b5e4208abccf546cdd0de2f>>. [Acessado 18 Nov, 2023].
- ANDERSON, J. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw hill, 2011.
- HURT, H. H. *Aerodynamics for naval aviators*. Office of the Chief of Naval Operations, Aviation Training Division, 1965.
- ABBOTT, I. H., VON DOENHOFF, A. E. *Theory of wing sections: including a summary of airfoil data*. Courier Corporation, 2012.
- BELEGUNDU, A. D., CHANDRUPATLA, T. R. *Optimization concepts and applications in engineering*. Cambridge University Press, 2019.
- COLAÇO, M. J., ORLANDE, H. R., DULIKRAVICH, G. S. “Inverse and optimization problems in heat transfer”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 28, pp. 1–24, 2006.
- Introduction to Algorithms*. 2013. doi: 10.1016/B978-0-12-416743-8.00001-4.

- Comparison of Heuristic and Metaheuristic Algorithms*, 2022. doi: 10.1109/UBMK55850.2022.9919459.
- AHMAD, M. F., ISA, N. A. M., LIM, W. H., et al. “Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works”, *Alexandria Engineering Journal*, v. 61, n. 5, pp. 3831–3872, 2022.
- RANA, S., SARWAR, M., SIDDIQUI, A. S., et al. “Particle Swarm Optimization: An Overview, Advancements and Hybridization”, *Optimization Techniques in Engineering: Advances and Applications*, pp. 95–113, 2023.
- EHTERAM, M., SEIFI, A., BANADKOOKI, F. B. “Structure of Particle Swarm Optimization (PSO)”. In: *Application of Machine Learning Models in Agricultural and Meteorological Sciences*, pp. 23–32, Springer Nature Singapore, 2023. doi: 10.1007/978-981-19-9733-4_2.
- GRANDIS, H., MAULANA, Y. “Particle swarm optimization (PSO) for magnetotelluric (MT) 1D inversion modeling”. In: *IOP conference series: Earth and Environmental Science*, v. 62, p. 012033. IOP Publishing, 2017.
- DRELA, M. “XFOIL: An analysis and design system for low Reynolds number airfoils”. In: *Low Reynolds number aerodynamics*, Springer, pp. 1–12, 1989.
- DA S. NETO, R. A., NOLETO, L. G., DE SOUZA, J. D. S. A., et al. “PARSEC PARAMETERIZATION METHODOLOGY FOR ENHANCING AIRFOILS GEOMETRY USING PSO ALGORITHM”, *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v. 2, pp. 1–14, jan. 2017. doi: 10.26512/ripe.v2i9.15031. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/15031>>.
- WEI, X., WANG, X., CHEN, S. “Research on parameterization and optimization procedure of low-Reynolds-number airfoils based on genetic algorithm and Bezier curve”, *Advances in Engineering Software*, v. 149, pp. 102864, 2020.
- SALUNKE, N. P., JUNED AHAMAD, R., CHANNIWALA, S. “Airfoil parameterization techniques: A review”, *American Journal of Mechanical Engineering*, v. 2, n. 4, pp. 99–102, 2014.
- MOHEBBI, F. *Optimal shape design based on body-fitted grid generation*. Tese de Doutorado, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 7 2014.
- JONKMAN, J., BUTTERFIELD, S., MUSIAL, W., et al. *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*. Relatório técnico,

- National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2009.
- TIMMER, W., BAK, C. “Aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoils”. In: *Advances in wind turbine blade design and materials*, Elsevier, pp. 129–167, 2023.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- INGRAM, G. “Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method. version 1.1”, *Durham University, Durham*, , n. 2011, 2011.
- JONKMAN, J. M., HAYMAN, G., JONKMAN, B., et al. “AeroDyn v15 user’s guide and theory manual”, *NREL Draft Report*, p. 46, 2015.
- AL-SOLIHAT, M. K., NAHON, M. “Flexible multibody dynamic modeling of a floating wind turbine”, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 142, pp. 518–529, 2018.
- MA, N., LEI, H., HAN, Z., et al. “Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio”, *Energy*, v. 150, pp. 236–252, 2018.
- DRELA, M., YOUNGREN, H. “XFOIL 6.9 User Primer, Online Software Manual”. 2001.
- MAHMUDDIN, F., KLARA, S., SITEPU, H., et al. “Airfoil lift and drag extrapolation with viterna and montgomerie methods”, *Energy Procedia*, v. 105, pp. 811–816, 2017.